UNIJUÍ - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul

DCEEng - Departamento de Ciências Exatas e Engenharias

Curso de Engenharia Mecânica – Campus Panambi

FÁBIO LEANDRO WOLLMANN

ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE GÁS HIDROGÊNIO EM VEÍCULOS AUTOMOTORES

Panambi

2013

FÁBIO LEANDRO WOLLMANN

ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE GÁS HIDROGÊNIO EM VEÍCULOS AUTOMOTORES

Trabalho de conclusão de curso apresentado à banca avaliadora do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Banca Avaliadora:
1° Avaliador: Prof. Gil Eduardo Guimarães, Dr.
2° Avaliador (Orientador): Prof. Roger Schildt Hoffmann, M.

BIOGRAFIA DO AUTOR

Fábio Leandro Wollmann, nascido em 1986 no município de Três de Maio do Estado do Rio Grande do Sul. Completou sua formação de ensino médio no Colégio Dom Hermeto em 2003 no município de Três de Maio/RS. Iniciou sua vida profissional em 2005 na Kepler Weber Industrial S.A. como ajudante geral no processo de galvanização a fogo. Ingressou no departamento de suprimentos da mesma empresa em 2007 como planejador de materiais. Neste mesmo setor trabalhou como comprador no período de 2009 a 2012. Atualmente exerce a mesma função junto à engenharia de movimentação de granéis sólidos onde é responsável por desenvolvimento de fornecedores, negociação de itens especiais e suporte entre as áreas de suprimentos e engenharia, todos estes para o segmento de movimentação de granéis sólidos. Pretende se especializar no futuro na área de Gestão de Projetos, a qual apresenta grandes potencialidades para o crescimento profissional.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, a ***Deus***, pela ajuda e sabedoria para enfrentar os desafios do cotidiano.

À ***família*** pelo incentivo, apoio constante e compreensão ímpar em períodos onde a busca pela graduação, exigiu redobrado tempo e atenção.

Aos meus ***colegas*** pelo grande apoio e pelos momentos de diálogo e discussões para desenvolvimento de ideias e esclarecimento de dúvidas.

Aos ***professores***, pela dedicação e paciência em transmitir conhecimento.

DEDICATÓRIA

Aos meus amados pais, Nelson Albino Wollmann e Iracema Pértile Wollmann. Aos queridos irmãos Fabiano e Fernando, por quem tenho um apreço inestimável. À minha namorada Pauline, a quem reservo o mais puro sentimento de amor e respeito.

Amo vocês!

RESUMO

Este estudo está direcionado ao setor de energias renováveis, mais propriamente focado nos geradores de hidrogênio por eletrólise e nos benefícios da queima do hidrogênio como combustível auxiliar. Em primeira instância, serão abordadas algumas informações básicas e curiosidades a respeito dessa tecnologia e seus constituintes. Será apresentado assim, um breve histórico sobre o gás hidrogênio, suas propriedades, e o embasamento científico referente à eletrólise da água e motores de combustão interna. Em sequência são apresentados alguns testes comparativos feitos em um automóvel com e sem a adição de gás hidrogênio.

Expressões chaves: Gerador de hidrogênio, combustível hidrogênio, eficiência energética.

ABSTRACT

This Essay regards to Renewables Energies, especifically focused on Hydrogen's Electrolysis Generators and their benefits as auxiliar fuel. First of all, some basic information and curiosities will be explained about this technology. Besides, a brief records about Hydrogen gás and it properties will be presented. The following steps will introduce some theorical references regarding electrolysis of water and internal combustion engines. Finally, will be presented the final results achieved with a mock up car establishing some tests comparisons with without Hydrogen.

Key expressions: Hydrogen generator, hydrogen fuel, energetic efficiency.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SIGLA	*DESCRIÇÃO*	*TRADUÇÃO*
MCI	*Motor de combustão interna*	---
RPM	*Rotações por minuto*	---
GLP	*Gás liquefeito de petróleo*	---
ATM	*Atmosféra*	---
$CNTP$	*Condições normais de temperatura e pressão*	---
GNV	*Gás natural veícular*	---
ECU	*Engine control unit*	*Unidade de controle do motor*
HHO	*Hydrogen, hydogen, oxygen*	*Hidrogênio, hidrogênio, oxigênio*
OBD	*On-Board Diagnostic*	*Porta de autodiagnóstico*
FS_2	*Fuel saver*	*Salvador de combustivel*
LEL	*Limit explosion least*	*Limite minimo de explosão*
UEL	*Limit explosion utmost*	*Limite máximo de explosão*

LISTA DE FORMULAÇÕES QUÍMICAS

FÓRMULA	*DESCRIÇÃO*
HC	*Hidrocarbonetos*
CO	*Monóxido de carbono*
CO_2	*Dióxido de carbono (Gás carôonico)*
e^-	*Representação dos elétrons*
H^+	*Íons de hidrogênio*
H_2	*Mólecula de gás hidrogênio*
KOH	*Hidróxido de potássio*
K^+	*Íons de potássio*
H_2O	*Fórmula empírica da molécula de água*
OH^-	*Ânion de hidroxido*
^4H	*Isótopo de hidrogênio*
O_2	*Mólecula de gás oxigênio*
(g)	*Representação de substância gasosa*
(l)	*Representação de substância líquida*
(aq)	*Representação de substância aquosa*

SIMBOLOGIA DE EXPRESSÕES MATEMÁTICAS

EXPRESSÃO	*DESCRIÇÃO*	*PRINCIPAIS UNIDADES*
A	*Área*	$m^2, cm^2\ mm^2$
$\dot{W}$	*Potência*	kW, W, mW
D	*Densidade*	kg/m^3
dE	*Diferencial da energia*	J
dS	*Diferencial da Entropia*	J/K
Dt	*Distância, comprimento*	$m, cm, mm, \mu m$
e	*Carga elétrica (Coulomb)*	C
E	*Energia*	J
V	*Tensão*	V
v	*Volume*	l, mm^3, m^3, ml
η	*Rendimento*	%
f	*Freqüência*	Hz
F	*Constante de Farady*	---
U	*Energia interna do sistema*	J
g	*Aceleração da gravidade*	m/s^2
H	*Entalpia*	J
I	*Corrente*	A, mA
λ	*Fator lambda*	%
m	*Massa*	kg, g
m_e	*Massa do elétron*	g, uma
m_{H_2}	*Massa de Hidrogênio*	kg, g
MM	*Massa molecular*	kg, g
T	*Temperatura*	$°C, K, °F$
t	*Tempo*	h, min, s
p	*Pressão*	$N/m^2, atm, bar, psi, mmHg$

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO

Diante das situações nos dias atuais, com as reservas de combustíveis fósseis chegando aos seus limites, é cada vez mais interessante identificar formas de energias alternativas. Atualmente a humanidade vive o auge do consumo de combustíveis fósseis e estimativas mostram que se continuarmos usando nossas reservas de combustíveis desta forma, tão logo a esgotaremos e consequentemente teríamos alterações nas condições climáticas devido a essa queima incontrolável.

O aumento da população mundial somado com a acelerada degradação ambiental vem provocando questionamentos e discussões na comunidade científica sobre o tema produção de energia. Essas discussões são estimuladas ainda pela necessidade de encontrar soluções mais eficientes e menos poluentes para a produção e consumo de energia, eliminando em partes a dependência que existe atualmente por combustíveis fósseis.

Como sempre, o "produto" energia é algo que representa às nações a possibilidade de supremacia sobre as demais. Para as nações em desenvolvimento, a possibilidade de deter tecnologias de geração de energia renovável, é algo que representa sair de uma posição de submissão para uma possível posição de referência.

Com isso, aproveitando esse panorama mundial, será abordada neste trabalho a produção de hidrogênio por meio de eletrólise, com potencial de uso como energia renovável, e assim a sua utilização como combustível na forma de gás auxiliar para queima em veículos automotores.

1. OBJETIVOS

1.1. Objetivo principal

Este trabalho tem com objetivo principal realizar uma pesquisa de comparação, sobre a utilização de gás hidrogênio como fonte de energia auxiliar na queima com a gasolina em veículos automotores. A presente pesquisa consiste em descrever o processo de geração de hidrogênio por eletrólise, a adaptação do sistema em um veículo automotor, as características deste sistema, realizar alguns testes, e baseado nestes, apresentar uma comparação dos benefícios desta aplicação com e sem o equipamento.

1.2. Objetivos específicos

Tem-se como objetivos específicos:

- ✓ A aquisição de um gerador de hidrogênio por eletrolise servindo como base para testes comparativos de potência, rendimento e emissão de poluentes.
- ✓ Realizar testes para comparação dos sistemas.
- ✓ Apresentar os cálculos e os resultados obtidos para propiciar discussões sobre a tecnologia em questão.
- ✓ Apresentar diagramas que representem de maneira gráfica os valores coletados e os resultados obtidos dos cálculos realizados.
- ✓ Difundir e despertar a curiosidade dos leitores sobre esse tema.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Hidrogênio

Para facilitar a compreensão das formas de utilização do gás hidrogênio H_2 em MCI, serão abordados as propriedades relevantes deste combustível e como este foi descoberto e utilizado ao longo dos tempos.

2.1.1. Histórico

O hidrogênio é o elemento mais abundante no universo. Ele compõe 75% de sua massa e 90% de suas moléculas, utilizar esta fonte de energia daria a humanidade uma reserva de energia ilimitada.

O primeiro registro histórico deu-se com o alquimista suíço Paracelsus (1493–1591), o qual misturou metais com ácidos e produziu um "ar explosivo" [1]. Nota-se que até então, não se tinha conhecimento de que esse gás fosse o H_2. [1]

Anos mais tarde, um cientista conhecido com Robert Boyle (1627–1691), mais conhecido pela Lei de Boyle para um gás ideal, realizou o mesmo experimento que Paracelsus, e resolveu publicar suas descobertas em um artigo, onde chamou o H_2 de "Solução inflamável de Marte". [1]

Somente então em 1766, Henry Cavendish (1731–1810), reconheceu este gás como uma substância química única. Esse reconhecimento se deu do resultado de uma reação entre metais e ácidos, o que originou um gás inflamável e que quando queimado na presença de ar, produzia água. [1]

Em 1785 Antoine Lavoisier (1743–1794), deu nome de hidrogênio ao elemento químico e provou que a água é composta desse elemento e de oxigênio. Também observou que quando o H_2 era queimado na presença de oxigênio, havia a formação de orvalho. [2]

O primeiro cientista conhecido a prever o potencial pleno do hidrogênio foi John Haldane (1892–1964). Em 1923, Haldane ministrava palestras onde afirmava que a energia do hidrogênio seria o combustível do futuro. Ele produziu um tratado cientifico relacionando os argumentos a favor do hidrogênio, descrevendo como ele seria produzido, armazenado e aplicado no futuro. [3]

2.1.2. Características do hidrogênio

O hidrogênio é o elemento químico mais abundante, mais simples e mais comum de todo o universo. No planeta Terra, compõe aproximadamente 70% da superfície terrestre. [4]

Em seu estado natural e sob condição ambiente, o H_2 é um gás inodoro, insípido e incolor, e se apresenta muito mais leve que o ar. Pode ser encontrado no estado líquido, ocupando um volume 700 vezes menor do que se estivesse em forma de gás. Entretanto, neste caso ele necessariamente tem que estar a uma temperatura de $-\ 253\ °C$ e à pressão atmosférica, em sistema de armazenamento conhecidos com sistemas criogênicos. Acima dessa temperatura, se transforma em gás o qual pode ser armazenado em cilindros de alta pressão. [4]

Como é quimicamente ativo, o H_2 está sempre à procura de outro elemento para se combinar. Dependendo da concentração, as misturas de gás H_2 com oxigênio são inflamáveis e até mesmo explosivas. Quando queimado com oxigênio puro, os únicos subprodutos são calor e água. Quando queimados com ar, constituído por 68% de nitrogênio e 21% de oxigênio, alguns óxidos de nitrogênio (NOX) são formados, entretanto, ainda assim é menos poluente que os combustíveis fósseis. [4].

Se tratando de tabela periódica, é o elemento químico que ocupa a primeira casa e é representado pela letra H. Trata-se de um elemento extremante simples, visto que tem um número atômico de 1 e uma massa atómica próxima de 1, dado que o seu isótopo mais abundante tem um núcleo unicamente constituído por um próton. [5]

O H_2 possui aproximadamente 2,4 vezes mais energia que o gás natural por unidade de massa, e cerca de 1100 vezes mais que uma bateria ácida. Sabendo que 1 kWh equivale a 3600 joules, na tabela 1 tem-se a representação desse potencial em relação a outras substâncias. [5]

O núcleo do isótopo mais abundante é formado por um único próton e nenhum nêutron. Entretanto, existem outros dois isótopos: o deutério, que tem um nêutron e o trítio que tem dois. Em 2001 foi criado em laboratório o isótopo ^4H e, a partir de 2003, foram sintetizados os isótopos ^5Haté ^7H. [5]

A tabela 1 mostra o comparativo do potencial energético de alguns combustíveis, juntamente com suas formas de armazenamento.

Tabela 1 – Comparativo do potencial energético.

Portador de energia	Forma de Armazenamento	Densidade de energia por massa (KWh/kg)	Densidade de energia por volume (KWh/m³)
Hidrogênio	Gás (200 atm)	33,3	0,53
	Gás (300 atm)	33,3	0,75
	Gás (800 atm)	33,3	2,92
	Líquido ($-253\ °C$)	33,3	2,36
	Hidretos metálicos	0,58	3,18
Gás natural	Gás (200 atm)	13,9	2,58
	Gás (300 atm)	13,9	3,38
	Líquido ($-162\ °C$)	13,9	5,8
GLP	Líquido	12,9	7,6
Metanol	Líquido	5,6	4,42
Gasolina	Líquido	12,7	8,76
Gasóleo	Líquido	11,7	9,7
Eletricidade	Bateria (Ácido - Chumbo)	0,05	0,1
	Bateria (Íons de Lítio)	0,25	0,05

Fonte: [Hidrogênio como Combustível, ALMEIDA. A.T]

Se tratando de segurança, haja vista que é um gás explosivo, abaixo são relacionadas em itens as principais características desse elemento.

- ✓ Não entra em detonação ao ar livre;
- ✓ Não é tóxico (mas pode ser asfixiante se consumir todo o oxigênio de um ambiente fechado);
- ✓ Não é radioativo;
- ✓ Não é corrosivo;
- ✓ Não contamina a água;
- ✓ Não é cancerígeno;
- ✓ Não entra em autoignição na temperatura ambiente;
- ✓ Tem alto coeficiente de difusão e por isso dilui rapidamente no ar;

- ✓ Quando sofre ignição ao ar livre, geralmente queima antes de atingir o valor limite para ocorrer à explosão;
- ✓ Não produz produtos perigosos de decomposição;

Na tabela 2 são apresentadas algumas informações técnicas do H.

Tabela 2 – Informações técnicas do hidrogênio.

INFORMAÇÕES SOBRE O HIDROGÊNIO		
Símbolo químico	H	
Cor	Incolor	
Estado físico a temperatura e pressão ambiente	Gás	
Temperatura de autoignição	584°C	
Poder Calorífico Inferior ($\mathrm{H_2}$líquido)	$3\ \mathrm{kWh/Nm^3}$	$10{,}8\ \mathrm{MJ/Nm^3}$
	$2{,}359\ \mathrm{kWh/l}$	$8{,}495\ \mathrm{MJ/l}$
	$33\ \mathrm{kWh/kg}$	$1220\ \mathrm{MJ/kg}$
Poder Calorífico Cuperior ($\mathrm{H_2}$líquido)	$3{,}54\ \mathrm{kWh/Nm^3}$	$12{,}75\ \mathrm{MJ/Nm^3}$
	$2{,}790\ \mathrm{kWh/l}$	$10{,}04\ \mathrm{MJ/l}$
	$39{,}41\ \mathrm{kWh/kg}$	$141{,}86\ \mathrm{MJ/kg}$
Poder calorífico superior ($\mathrm{HHV\ do\ H_2}$)	$142000\ \mathrm{J/g}$	
Densidade (0°C e 1 atm)	$0{,}0899\ \mathrm{kg/m^3}$	$70{,}79\ \mathrm{kg/m^3}$ ($\mathrm{H_2}$líquido)
Ponto de ebulição	$-252{,}8\ °C$ (na pressão de $1\ atm$)	
Limite de inflamabilidade no ar	Inflamável entre as concentrações de 4% a 75% de $\mathrm{H_2}$ por volume	
Coeficiente de difusão	$0{,}61\ \mathrm{cm^2/s}$	
A energia contida em 1 m^3 de H_2 equivale a 0,34 litros de gasolina		
A energia contida em 1 litro de hidrogênio líquido equivale a 0,26 litros de gasolina		
A energia contida em 1 kg de H_2 equivale a 2,75 kg de gasolina (baseado em valor calorífica)		
Massa atômica do H_2 = $1{,}00784$ uma = $1{,}00784$ mol		

Fonte: [Hidrogênio Evoluir Sem Poluir, NETO, EMILIO H. G.]

2.1.3. Combustão do hidrogênio

Quando armazenado sob alta pressão ou no estado liquido, o hidrogênio em contato com o ar atmosférico tem uma grande capacidade de queima, altamente severa. Geralmente quando há vazamento de hidrogênio; em um caso verificasse a própria

dissipação deste gás no ar em ambientes abertos, cuja queima dura frações de segundos; por outro lado, se o vazamento ocorre em locais fechados, como em garagens, tuneis ou oficinas a dissipação do gás hidrogênio é muito deficiente, e no caso de entrar em combustão, podem ocorrer graves acidentes devido a alta velocidade de propagação da chama, algo em torno de 40cm/s. [6]

Por outro lado numa condição extrema de temperatura negativa, existe hidrogênio no estado criogênico (temperatura menor que -70°C) e em caso de acidentes, causa queimaduras criogênicas ou congelantes, além da hipotermia aos seres humanos, dano aos pulmões caso o vapor seja inalado. Além disso, vazamentos de hidrogênio no estado líquido podem fazer uma estrutura metálica entrar em colapso, pois o aço da estrutura afetada passa muito rapidamente do estado dúctil para frágil, podendo haver trincas ou fratura do metal. No caso de vazamento no interior de veículos, no local onde o tanque esta situado, toda a estrutura dos arredores fica comprometida. [6]

Em locais fechados o vazamento de hidrogênio é ainda mais perigoso, pois a razão de expansão deste gás no estado líquido (-253°C) para temperatura ambiente (25°C) é de 1:840, nesta condição o gás se expande violentamente e se torna uma potencial fonte de combustível para alimentar as chamas, no caso de ocorrer sua ignição. [6]

Pode-se verificar durante a combustão do hidrogênio, um fenômeno chamado *flash-fire*, ou flash de queima. Este fenômeno é o evento da combustão com baixa ou sem pressão positiva, e como o próprio nome sugere, este processo ocorre em um intervalo de tempo extremamente pequeno, até que todo o hidrogênio seja consumido. Quando o gás hidrogênio é liberado no ar, tipicamente a sua concentração é muito alta no ponto onde ocorreu o vazamento, e nesta região a mistura ar mais hidrogênio é muito baixa. Se o gás hidrogênio entrar em ignição neste exato momento, o resultado é o *flash* de queima. [6]

Neste ínfimo processo o hidrogênio queima dentro de vapor d'água. Enquanto o *flash* de queima aparece como sendo um rápido evento, a velocidade da queima ocorre em um valor de regime laminar. A velocidade da queima esta entre 102 a346 cm/s, dependendo da concentração do hidrogênio no ambiente em questão. [6]

2.1.4. Fogo

O fogo é um evento de não explosão que ocorre entre oxigênio e combustível. No fogo a chama pode ser relativamente estacionária, com o combustível e o ar se difundindo laminarmente dentro da zona de combustão, isto geralmente é chamado de difusão, por que o oxigênio do ar e o material combustível misturam-se por processo de difusão molecular de forma lenta e compassada na combustão. A chama do fogo produz a mesma energia de um evento de deflagração, porém tem uma baixa energia liberada, misturas de ar e hidrogênio queimam sem produzir fumaça, cuja chama é de difícil detecção. [5]

A concentração estequiométrica é a proporção perfeita de oxigênio (sendo este ar) e gás combustível para a combustão mais completa. Para hidrogênio no ar a concentração estequiométrica é 29,5%. Para mistura fraca de hidrogênio (abaixo de 8% do volume de concentração) acesa em uma câmara teste de combustão, as razões de compressão são muito menores que 8:1, na extensão de 14:1 até 3:1. [6]

2.1.5. Deflagração

Uma deflagração é um evento de combustão, onde a frente de onda de combustão é subsônica. Para deflagração de gás, o material combustível e o agente oxidante (oxigênio do ar) são pré-misturados. [5]

Esta mistura assegura adequada proporção ar mais oxigênio para a combustão. Toda a zona inflamável em torno de 4% e 75% de concentração de hidrogênio no ar pode suportar um evento de deflagração. Uma importante característica da deflagração do hidrogênio é que este possui uma alta velocidade de chama. A velocidade da chama é uma medida da razão a que a chama irá se propagar a um absorvedor fixo e não é sinônimo de velocidade de queima, a velocidade de queima fundamentalmente é a taxa em que uma onda de combustão plana irá propagar-se em mistura inflamável. [5]

A velocidade de queima muda com a mudança de concentração de hidrogênio. A velocidade é 255cm/s à condição estequiométrica do ar, e a máxima velocidade máxima velocidade de queima ocorre para uma concentração de hidrogênio no ar de 40%, a velocidade da chama é geralmente muito maior que a velocidade de queima, porque a mistura inflamável de gases somente aparece à frente da chama (onda de combustão) e é empurrada pela expansão de gases quentes, os produtos da combustão vem da onda de combustão. [5]

A velocidade da queima e a velocidade de combustão poderão aumentar com o aumento da temperatura da substância gasosa, com o aumento da pressão, e geralmente com o aumento da concentração. A velocidade da queima maximiza-se para gases combustíveis ricos de uma concentração estequiométrica. [5]

Deflagrações podem de certa forma, passar para uma condição de detonação onde a onda é aumentada por fatores tais como: concentração de hidrogênio de 18% a 59%, o grau de confinamento do gás, a presença de obstáculos ou condições que promovam turbulência no gás em processo de queima e a potência da fonte ignitora. Outros fatores incluem condições climáticas como umidade, ventos e inversões atmosféricas que poderão parcialmente refletir em uma onda de combustão voltando em direção ao chão. Pesquisadores afirmam que é muito difícil de ocorrer transição de deflagração para detonação em ambiente ao ar livre, desde que haja um ignitor fraco. [6]

2.1.6. Velocidade de queima

Esta é a velocidade em que a chama viaja através de uma mistura gasosa combustível. A velocidade de queima é diferente da velocidade da chama. A velocidade da queima indica a severidade de uma explosão desde que a velocidade de queima tenha uma grande tendência de suportar a transição de deflagração/ detonação em túneis longos ou tubos. A velocidade da chama é a soma da velocidade de queima e a velocidade de deslocamento da mistura não queimada. Velocidades de queima variam com a concentração de gás e aumentam em ambos os fins da extensão de flamabilidade. Abaixo do limite mínimo de flamabilidade e acima do limite máximo de flamabilidade a velocidade de queima é zero. A velocidade de queima do hidrogênio é 2,65 a 3,25m/s e é uma ordem de magnitude alta se comparado com o metano ou gasolina (a condições estequiométricas). Sendo assim o hidrogênio queima rapidamente, sua vida é muito curta. [7]

2.1.7. Detonação

Uma detonação também é um evento de combustão, onde a onda de queima possui velocidade supersônica no ambiente não reagido. [7]

Uma detonação é tipicamente um evento que ocorre em uma escala de tempo muito pequena, com uma grande quantidade de energia liberada. Uma detonação de um gás

combustível ocorre numa composição pré-misturada, como na deflagração. Os limites mínimos e máximos para detonação são 18,3% e 59% de concentração de hidrogênio no ar.

Uma detonação requer um ignitor de alta energia, 10kJ ou mais. A máxima sobrepressão teórica obtida da detonação de uma nuvem de hidrogênio é 14,5 atmosferas, se essa nuvem de gás for diretamente acendida. [7]

Uma interessante e importante característica do choque de detonação é a formação de células de detonação. Uma célula é um volume físico formado pelas ondas de choque viajando através da atmosfera não reagida. Ondas de choque refletem em todos os objetos em seu caminho, bem como na terra, montanhas e construções. A tabela 3 nos dá um resumo das propriedades de deflagração e detonação do hidrogênio, a temperatura e pressão ambiente (1 atm à 25°C). [7]

Tabela 3 – Propriedades de combustaão do gás hidrogênio no ar a 1atm e 25°C.

Propriedade de combustão	Deflagração do hidrogênio	Detonação do hidrogênio	unidades
Calor da reação alto	142,5	142,5	MJ/kg
Limite flamável inferior no ar	4,1 ou 3,6g/m³ de ar	18,3 ou 16,1g/m³ de ar	Volume %
Limite flamável superior no ar	74 ou 67g/m³ de ar	59 ou 51,8g/m³ de ar	Volume %
Mistura de detonação ótima no ar (relação estequiométrica)	-	29,53	Volume %
Sobrepresão máxima de detonação no ar	-	1,46	MPa
Temperatura de auto ignição	574	574	°C
Energia minima de ignição	0,02 a 29,53%	$\geq 10^7$	mJ
Temperatura máxima da chamada ao ar	2318	2318	K
Energia de explosão	-	2,02	Kg TNT por m³ de gás na CNTP
Velocidade laminar de queima ao ar, varia com a percentagem de H_2 no ar	102 a 325	-	cm/s
Velocidade de detonação ao ar	-	1,48 a 2,15	km/s
Máxima relação de sobrepressão	8:1	14,5:1	

Fonte: [Constant volume adiabatic combustion of stoichiometric hydrogen oxygen mixtures]

2.1.8. Flashponit

Todos os combustíveis queimam somente no estado gasoso ou em forma de vapor. Combustíveis como o hidrogênio e metano são gases a condição atmosférica, enquanto outros combustíveis como gasolina ou diesel precisam converter-se a vapor antes de serem queimados. A característica que descreve como facilmente estes combustíveis podem ser convertidos a vapor é o *flashpoint*. O *flashpoint* é definido como a temperatura em que o combustível produz vapores para formar uma mistura explosiva juntamente com o ar. [7]

Se a temperatura do combustível está abaixo do seu *flashpoint*, este não produz vapor para queimar. Sempre que seu combustível está em ou acima de seu *flashpoint*, vapores estão presentes. [7]

O *flashpoint* não é a temperatura em que o combustível incendeia-se em chamas, esta é a temperatura de autoignição. O *flashpoint* é sempre mais baixo que o ponto de ebulição. [7]

A tabela 4 nos dá o valor do *flashpoint* para alguns combustíveis. Para combustíveis que são gases a condições atmosféricas (hidrogênio, metano e propano) o *flashpoint* é menor que a temperatura ambiente e possui pouca relevância, desde que o combustível esteja totalmente vaporizado. [7]

Tabela 4 – Valores do flash point para alguns combustiveis.

Combustível	Fashpoint
Hidrogênio	< -253°C
Metano	-188°C
Propano	-104°C
Gasolina	Aprox. -43°C
Metanol	11°C

Fonte: [Hydrogen Properties, College of the Desert]

2.1.9. Extensão de flamabilidade

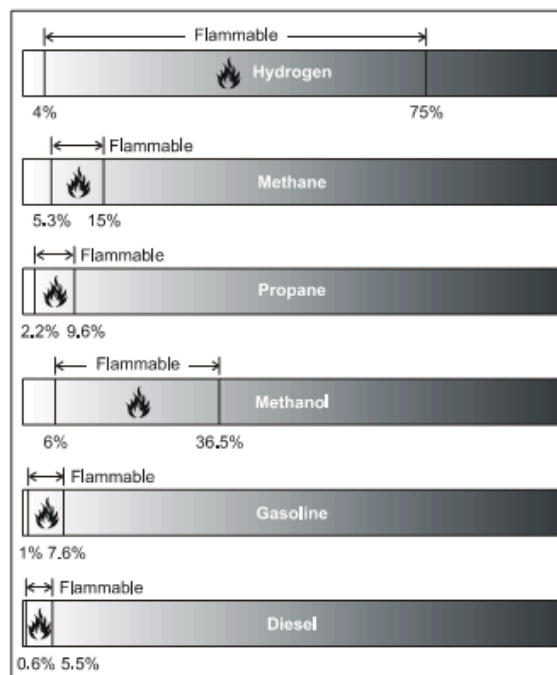
A extensão de flamabilidade de um gás é definida em termos de seu limite mínimo de flamabilidade e seu limite máximo de flamabilidade. O limite mínimo de flamabilidade de um gás é a menor concentração de gás que poderá sustentar a própria propagação da chama

quando misturado e aceso. Abaixo do limite mínimo de flamabilidade não existe combustível para suportar uma combustão, a mistura ar/combustível é muito fraca. [7]

Acima do limite superior de flamabilidade não há oxigênio para suportar a combustão, a mistura de ar/combustível é muito rica. Entre estes dois limites há o grau de flamabilidade em que o ar+combustível está na quantidade certa para queimar quando acesos. Uma mistura estequiométrica ocorre quando as moléculas de oxigênio e hidrogênio estão presentes na proporção exata necessária para completar a reação de combustão. [7]

Se mais hidrogênio estiver disponível que o oxigênio a mistura é considerada rica, sendo assim, uma certa quantidade de combustível permanecerá não-reagido e todo o oxigênio é consumido. Se menos hidrogênio for disponível do que o oxigênio acontece o contrário onde restará oxigênio não-reagido. Praticamente todos os motores de combustão interna e células de combustível operam tipicamente com misturas fracas para que a reação seja completa e consuma todo combustível consumido. [7]

Uma consequência do limite máximo de flamabilidade é que o hidrogênio armazenado (gasoso ou líquido) não é inflamável enquanto armazenado sem a presença de oxigênio em cilindros. O combustível somente torna-se inflamável nas áreas periféricas de um vazamento onde há mistura com ar em proporções suficientes.

Figura 1 – Extensão de flamabilidade para vários combustiveis a temperatura atmosférica.

Fonte: [Hydrogen Properties, pagina 20]

Dois conceitos relacionados a este tema são: o limite mínimo de explosão (LEL) e o limite máximo de explosão (UEL). [7]

LEL é a menor concentração de gás que poderá suportar uma explosão quando misturado com ar em condições de ambientes fechados. Similarmente UEL é a maior concentração de gás que poderá suportar uma explosão quando misturado com ar, acesa e contida. Uma explosão difere do fogo devido a explosão ocorrer em ambientes fechados de tal forma que a temperatura e a pressão aumente de forma destrutiva. [7]

Por esta razão é muito mais perigoso liberar hidrogênio em uma área fechada (como uma garagem) do que em locais abertos e ventilados. Lembre-se que o gás hidrogênio é inflamável em uma vasta concentração no ar (4 – 75%) e é explosivo também em uma grande faixa de concentração (15 – 59%) a condições normais de pressão e temperatura.

O limite de flamabilidade aumenta com a temperatura. A figura 1 mostra uma comparação dos limites de flamabilidade de alguns combustíveis. [7]

2.1.10. Temperatura de autoignição

A temperatura de autoignição é a mínima temperatura requerida para que ocorra uma combustão sustentável em uma mistura combustível sem que haja uma fonte ignitora. Em outras palavras o combustível é aquecido até que este queime em chamas. Cada combustível possui uma temperatura de ignição única. Para o hidrogênio a temperatura de autoignição é relativamente alta (585^{o}C). Isto torna difícil de acender uma mistura de ar/hidrogênio somente com calor, sem uma fonte de ignição adicional. A tabela 5 mostra uma comparação da temperatura de autoignição de alguns combustíveis. [7]

Tabela 5 – Tabela comparativa da ignição de alguns combustiveis.

Combustivel	Temperatura de autoignição
Hidrogênio	585°C
Metano	540°C
Propano	490°C
Gasolina	230 a 480°C
Metanol	385°C

Fonte: [Hydrogen Properties, College of the Desert]

2.1.11. Número de octanagem

O número de octanagem descreve as propriedades de um combustível de resistir à explosão por pressão quando usado em motores de combustão interna.

Auto detonação é uma detonação secundária que ocorre depois da ignição do combustível devido ao calor subir em algum ponto específico da câmara de combustão, de forma que esta temperatura local exceda a temperatura de autoignição do combustível. O desempenho do octano de combustíveis hidrocarbonetos é usado como uma norma para medir a resistência a batidas cujo valor relativo foi estabelecido em 100. O hidrogênio possui um grande valor de número de octano e, além disso, é resistente a auto detonação sempre que queimado sob condições de misturas fracas. [7]

A tabela 6 mostra um comparativo do número de octanagem de combustíveis. Em células de combustíveis o número de octanagem é irrelevante.

Tabela 6 – Comparativo do numero de octanagem de alguns combustiveis.

Combustível	Número de octano
Hidrogênio	130 + (queima branda)
Metano	125
Propano	105
Octano	100
Gasolina	87
Metanol	30

Fonte: [Hydrogen Properties, College of the Desert]

2.1.12. Energia de ignição

Energia de ignição é a soma de energia externa que pode ser aplicada a fim de acender uma mistura de combustível. A energia de uma fonte externa deve ser maior que a temperatura de autoignição e ser de duração suficiente para aquecer o vapor de combustível até sua temperatura de ignição. Fontes comuns de ignição são chamadas de faíscas. Embora o hidrogênio possua uma alta temperatura de autoignição em relação ao metano, propano e gasolina, sua energia de ignição a $1{,}9.10^{-8}$ BTU (0,02mJ) é de baixa magnitude e entra em ignição muito facilmente. Uma faísca invisível ou eletricidade estática proveniente de uma descarga elétrica de um corpo em condições de clima seco poderá

conter energia suficiente para iniciar a ignição de uma mistura ar/combustível. O hidrogênio tem a propriedade de baixa eletrocondutividade sendo que o fluxo ou agitação do gás ou líquido poderá gerar cargas eletrostáticas que resultam em faíscas. Por esta razão todos os equipamentos que armazenam e distribuem hidrogênio devem estar aterrados. [7]

2.1.13. Distância de extinção de chama

Descreve a propriedade de extinção da chama de um combustível quando usado em motores de combustão interna. Especificamente a distância de extinção considera a distância das paredes do cilindro do motor onde as chamas extinguem-se devido às perdas de calor. A distância de extinção da chama não possui relevância em células de combustíveis. A distância de extinção de chama para o hidrogênio (0,064 cm) é aproximadamente 3 vezes menor que para outros combustíveis (gasolina e metano).

A tabela 7 mostra as propriedades relevantes ao uso do hidrogênio em motores de combustão interna.

Tabela 7 – Propriedade relevantes ao uso do hidrogênio em MCIs. [8]

Propriedade	Gasolina	GNV	Hidrogênio	Efeito
Limite de flamabilidade	0,7 a 4	0,4 a 1,6	0,1 a 7,1	Grande extensão de flamabilidade***
Velocidade laminar de chama (m/s)	0,37 a 0,43	0,38	1,85	Alta velocidade de chama (boa estabilidade)***
Número de octano pesquisado	87 a 99	140	>120	Altas taxas de compressão
Temp. de chama adiabática (K)	2580	2214	2480	
Mínima energia de ignição *	0,24	0,28	0,02	
Temperatura de auto ignição (K)*	550	723	858	Propenso a pré ignição **
Distância de extinção de chama (mm)	2	2,1	0,64	
Valor calorifico inferior (MJ/kg)*	44,79	45,8	119,7	
Calor de combustão (MJ/kg)*	2,83	2,9	3,37	

*Vapor de gasolina **Desfavorável ***Favorável

Fonte: [Advanced Hydrogen-Fueled Engines:Potential end Challenges, WHITE, CHRISTOPER,]

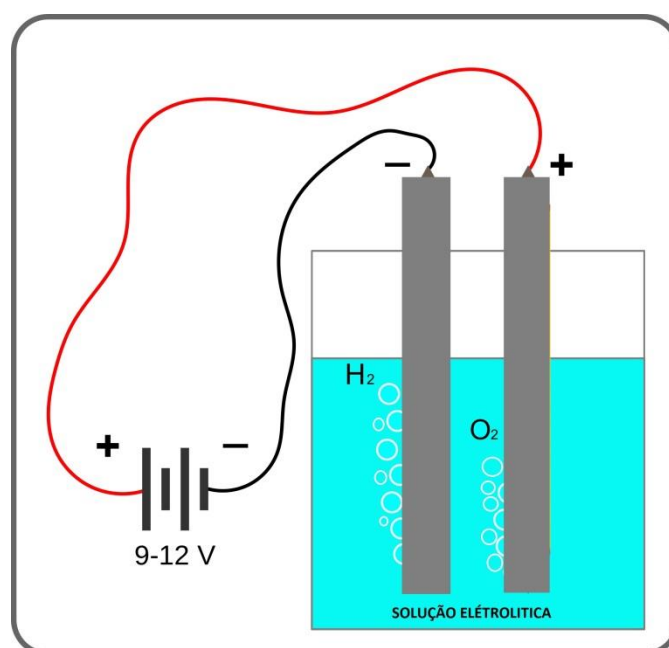
Conhecendo todas estas características vistas anteriormente conclui-se que o hidrogênio queima com mais vigor do que a gasolina, porém por um tempo mais curto.

2.2. Eletrólise da água

A eletrólise é uma reação não espontânea de decomposição de uma substância, por meio de corrente elétrica. A eletrólise é um processo eletroquímico, caracterizado pela ocorrência de reações de oxi-redução em uma solução condutora quando se estabelece uma diferença de potencial elétrico entre dois eletrodos mergulhados nessa solução. [9]

Durante a eletrólise ocorre primeiro a decomposição (ionização ou dissociação) do composto em íons, posteriormente com a passagem de uma corrente contínua através destes íons, são obtidos os elementos químicos. Em muitos casos, dependendo da substância a ser eletrolisada e do meio em que ela ocorre, além de formar elementos ocorre também à formação de novos compostos. A denominação solução eletrolítica, empregada para designar qualquer solução aquosa condutora de eletricidade, deriva justamente desse processo [9].

A Figura 2 mostra o esquema de uma célula eletrolítica na qual ocorre a eletrólise da água salgada.

Figura 2 – Gerador de hidrogênio por eletrólise.

Fonte: [Autor]

Um composto iônico, neste caso o KOH é dissolvido em água, de modo que seus íons estejam dispersos e disponíveis no líquido. Uma corrente elétrica é aplicada entre um par de eletrodos inertes imersos no líquido. O eletrodo de carga negativa é chamado de cátodo, enquanto o de carga positiva é o ânodo. Cada eletrodo atrai íons de carga oposta, portanto, os íons carregados positivamente (chamados cátions) movem-se no sentido do cátodo, enquanto os íons carregados negativamente (chamado ânions) se movem em direção ao ânodo. [9]

A energia necessária para separar os íons e levá-los a unirem-se nos respectivos eletrodos, é fornecida por uma fonte externa de energia elétrica. Na interface eletrodo/eletrólito os elétrons são absorvidos ou liberados pelos íons, formando novas moléculas e/ou compostos químicos, de acordo com as substâncias disponíveis no meio. No caso demonstrado na Figura 2, tem-se dois eletrodos inertes imersos em uma mistura de água e sal ($H_2O_{(l)}$ + $KOH_{(aq)}$). [9]

Na solução temos:

$$KOH_{(aq)} = \mathrm{K}^+_{(aq)} + OH^-_{(aq)}$$

$$H_2O_{(l)} = \mathrm{H}^+_{(aq)} + OH^-_{(aq)}$$

Tabela 8 – Reações do hidrogênio.

	Cátodo	Ânodo
Migração de íons	K^+ e H^+	OH^- da água e OH^- da base
Facilidade de descarga	$H^+ > K^+$	OH^-
Semi-reação	$4H_2O_{(l)} + 4e^- = 2H_{2(g)} + K^+$	$4OH^-_{(aq)} = 2H_2O_{(l)} + O_{2(g)} + 4e^-$
Permanece na solução	K^+	OH^-

Fonte: [Curso Completo de Química, SARDELLA, Antonio]

SARDELLA [9] explica que os cátions formados H^+ e K^+ deverão ser atraídos pelo cátodo, e os ânions OH^- da água e da base serão atraídos pelo ânodo. Assim, formam-se nos eletrodos o gás hidrogênioH_2 e oxigênio O_2, que poderão ser vistos borbulhando no entorno dos respectivos eletrodos, enquanto os elementos restantes K^+ e OH^- se unirão e formarão moléculas de Hidróxido de Potássio KOH.

2.2.1. Solução eletrolítica ou eletrólito

Em química, um eletrólito é qualquer substância que contenha íons livres que fazem a substância eletricamente condutiva. O eletrólito mais típico é uma solução iônica, mas eletrólitos fundidos e eletrólitos sólidos também são possíveis. [10]

Eletrólitos comumente existem como soluções de ácidos, bases ou sais. Além disso, alguns gases podem agir como eletrólitos em condições de alta temperatura ou baixa pressão. Soluções de eletrólitos pode também resultar da dissolução de alguns polímeros biológicos (DNA, por exemplo, polipeptídeos) e sintéticos (por exemplo, sulfonato de poliestireno), denominada polieletrólitos, que contêm cobrado grupo funcional. [10]

Soluções de eletrólitos são normalmente formados quando um sal é colocado em um solvente como a água e os componentes individuais dissociar devido às interações termodinâmicas entre as moléculas de solvente e soluto, em um processo chamado solvatação. [10]

Um eletrólito em uma solução pode ser descrita como concentrada se ele tem uma alta concentração de íons, ou diluir se tiver uma baixa concentração. Se uma alta proporção do soluto se dissocia para formar íons livres, o eletrólito é forte, se a maioria dos solutos não dissociar, o eletrólito é fraco. As propriedades de eletrólitos podem ser exploradas através da eletrólise para extrair elementos constitutivos e os compostos contidos na solução. [10]

2.3. Motores de combustão interna

A maioria dos veículos atualmente usa motores que possuem o ciclo de combustão de quatro tempos para converter a energia concentrada na gasolina em movimento. Este tipo de veículo recebe o nome ciclo Otto em homenagem a Nikolaus Otto que o inventou em 1867. [13]

Os motores de antigamente, fabricados na década de 80, eram feitos geralmente de aço e ferro fundido. Contudo, atualmente, por motivos de economia e durabilidade, esses mesmos motores estão sendo desenvolvidos com aço e alumínio, por ser um material mais leve e de difícil oxidação. [13]

Para que um motor realize trabalho de forma intermitente ou interruptamente, a substância de trabalho passa por uma série fechada de processos termodinâmicos,

chamados de tempos, voltando repetidamente a cada estado neste ciclo (cabe ressaltar que no motor real o ciclo não é totalmente fechado).

A estrutura básica desse motor é demonstrada na figura 3.

Figura 3 – Estrutura de um motor de 4 tempos.

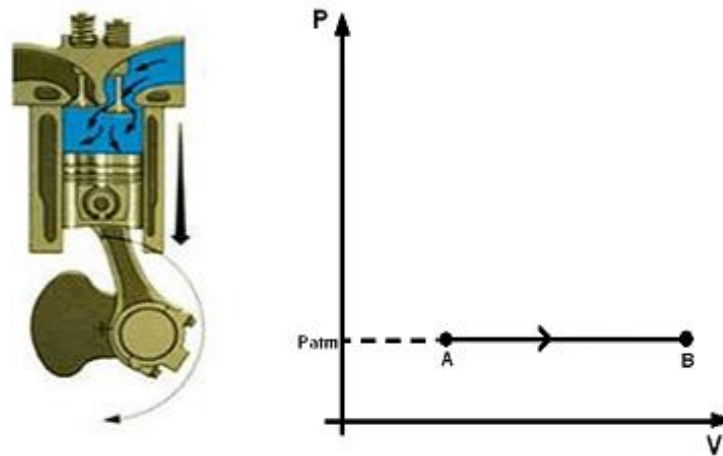
Fonte: [Uol educação, Física do automóvel, adaptado].

2.3.1. Ciclo Otto

Os processos que ocorrem nos motores a álcool, a gasolina ou flex de quatro tempos são representados logo a seguir por meio de diagramas que representam o ciclo do motor a combustão interna: ciclo Otto. As figuras 4, 5, 6 e 7 demonstram o funcionamento de um ciclo em etapas por meio de diagramas de pressão por volume. A figura 8 apresenta o ciclo ideal completo e a figura 9 apresenta um ciclo real completo. [13]

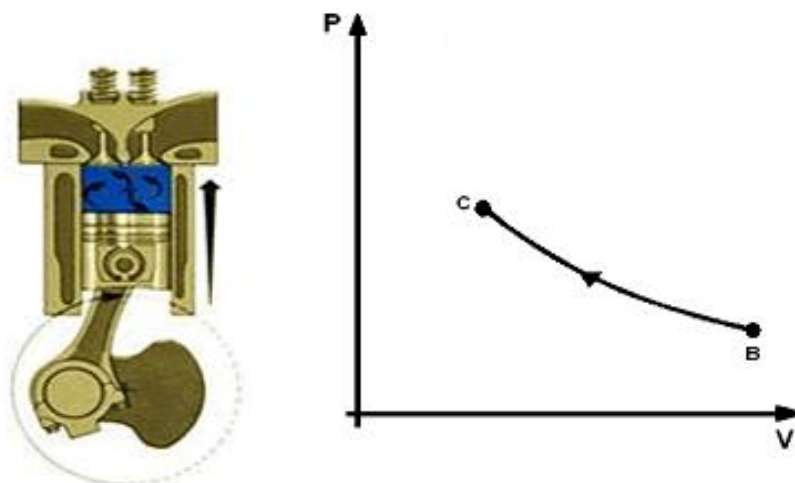
Admissão da mistura: 1° tempo

Abertura da válvula de admissão: nesta situação a velocidade de avanço da mistura dos fluidos é praticamente igual à velocidade do pistão. Em consequência desse fato, a pressão fica praticamente constante e o volume aumenta: processo isobárico ($A \rightarrow B$), conforme mostra a figura 4. [13]

Figura 4 – Admissão da mistura, 1º tempo.

Fonte: [Uol Educação, Física do automóvel e GREF, com adaptações].

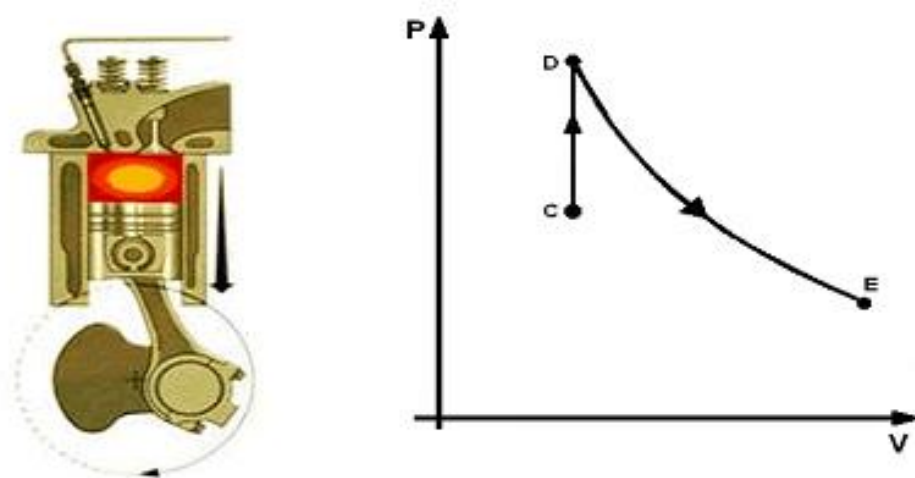
Compressão da mistura: 2° tempo

Nesta situação o trabalho do pistão é convertido totalmente em energia interna da mescla dos fluidos que possuem a pressão e temperaturas elevadas. Essa condição produz uma compressão adiabática, pois o processo é muito rápido e praticamente não há trocas de calor. O volume diminui à medida que a pressão e a temperatura aumentam $(B \rightarrow C)$, conforme esboça a figura 5. [13]

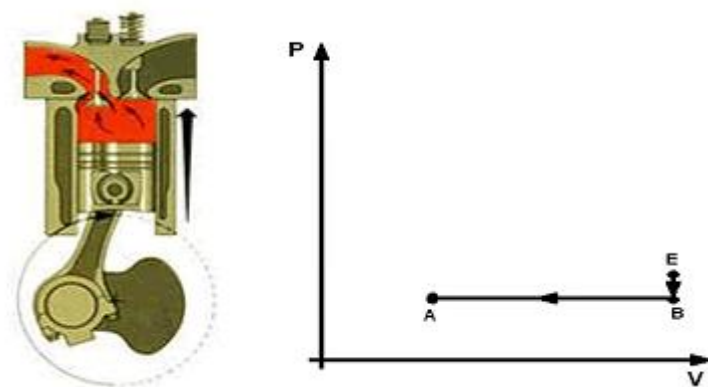
Figura 5 – Compressão da mistura, 2º tempo.

Fonte: [Uol Educação, Física do automóvel e GREF, com adaptações].

Explosão da mistura: 3° tempo

Neste trecho ocorre a explosão e não há variação de volume, já que a reação química é muito rápida (não há consequentemente o movimento do pistão). Também ocorre um grande aumento da temperatura e pressão $(C \to D)$ (figura 5); Na segunda parte da explosão $(D \to E)$, o pistão desce com extrema rapidez, não havendo assim trocas de calor. Por esse motivo a expansão é considerada adiabática conforme mostra a figura 6. [13]

Figura 6 – Explosão da mistura, 3º tempo.

Fonte: [Uol Educação, Física do automóvel e GREF, com adaptações].

Escape dos gases: 4° tempo

Figura 7 – Exaustão dos gases, 4º tempo.

Fonte: [Uol Educação, Física do automóvel e GREF, com adaptações].

Com a abertura da válvula no motor $(E \rightarrow B)$ ocorre a variação da pressão e da massa da mistura, não havendo assim tempo para a mudança de curso do pistão e, portanto, a não variação do volume. Essa descompressão é considerada isométrica (conforme mostra a figura 6).

A exaustão dos gases ocorre no trecho $(B \rightarrow A)$. Neste processo a massa do gás presente no cilindro diminui na mesma proporção que o volume e é considerado isobárico, conforme demonstra a figura 7.

Os processos descritos logo acima são representados de forma conjunta no diagrama P x V (figura 8) para o ciclo completo do motor a combustão interna, que é denominado ciclo Otto. [13]

Figura 8 – Gráfico que representa o Ciclo Otto ideal completo.

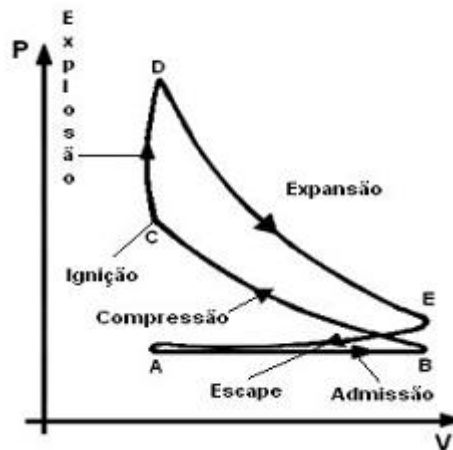
Fonte: [Uol Educação, Física do automóvel e GREF, com adaptações].

Os processos descritos acima são situações bem próximas do real. Dessa forma, o diagrama das variações da pressão e do volume em um motor real manifesta alguma diferença em relação ao analisado precedentemente. Na admissão a pressão não permanece constante (o processo não é perfeitamente isobárico), pois o volume da mistura ar/combustível não acompanha o movimento do pistão, havendo, portanto certa diminuição de pressão. Na explosão, o processo não é perfeitamente isovolumétrico (isométrico) porque não acontece instantaneamente e ocorre com certa velocidade do pistão. [13]

A exaustão isométrica vista no ciclo Otto ideal não chega a ocorrer no ciclo real, porque o cilindro inverte bruscamente sua velocidade (transmitida pelo eixo) e já empurra a

mistura queimada para fora. A exaustão real não é de fato isobárica porque o pistão tem velocidade inferior com relação à velocidade de escape do gás. [13]

O diagrama P x V da figura 9 apresenta o ciclo completo de um motor real.

Figura 9 – Gráfico que representa o Ciclo Otto real completo.

Fonte: [Uol Educação, Física do automóvel e GREF, com adaptações].

2.3.2. TRABALHO REALIZADO NO MOTOR

O trabalho é realizado somente no terceiro tempo. Nos demais, onde ocorre a admissão, compressão e escape, o movimento contínuo do pistão ocorre por meio de um trabalho externo por causa da inércia do volante ou do conjunto do sistema em que estão acoplados vários pistões à árvore de manivelas. Ademais, uma parcela do calor de combustão é eliminada na forma de energia interna dos gases, levando em consideração também, a troca contínua de calor entre o corpo do motor e o ambiente. A parte restante do calor de combustão está relacionada à energia de movimento do pistão – realização de trabalho – fechando dessa forma o balanço energético. [13]

A realização de trabalho W e o aumento da energia interna $-\Delta U$ devido à quantidade de calor $-Q$ estão de acordo com o princípio de conservação de energia denominada Primeira Lei da Termodinâmica, expressa matematicamente pela equação 1. [13]

$$Q = \Delta U + W \quad (1)$$

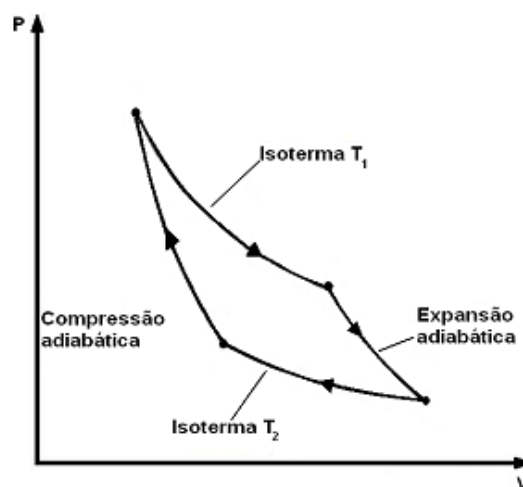
2.3.3. Rendimento das maquinas térmicas

O rendimento real de um motor, em que a energia liberada na combustão faz os pistões se movimentarem em um motor ciclo Otto, está próximo de 21% a 25%. A energia restante é perdida de forma mecânica ($\sim 8\%$ por meio do atrito das superfícies metálicas do veículo, da inércia do pistão e em energia sonora) e térmica ($\sim 32\%$ em troca de calor do motor com o ambiente por meio do sistema de refrigeração e 35% em energia interna dos gases provindos da combustão e exauridos pelo escapamento). No total, a perda de energia gira em torno de 75% a 80%. [13]

O rendimento de uma máquina é determinado como a razão entre o trabalho produzido e a energia fornecida conforme demonstra a equação 2:

$$\eta = \frac{W}{Q} \qquad (2)$$

Cujo η é o rendimento da máquina, W é o trabalho realizado pela mesma e Qé a quantidade de calor. Caso toda energia do carburante fosse convertida em trabalho mecânico, o rendimento seria 1 ou 100%. Situação que na realidade nunca ocorre de acordo com o engenheiro francês N. L. Sadi Carnot, pioneiro nos estudo de motores em 1824. Segundo este estudioso, o motor pode ter um rendimento máximo de aproximadamente 50% independente da substância de trabalho usada e desconsiderando as questões técnicas.

Figura 10 – Gráfico que representa o Ciclo de Carnot.

Fonte: [Uol Educação, Física do automóvel e GREF, com adaptações].

Com isso foi formulado um ciclo ideal construído devido à necessidade de aperfeiçoar o rendimento das máquinas térmicas reais. Esse ciclo foi denominado ciclo de Carnot (demonstrado na figura 10).

2.3.4. Relação estequiométrica – Ar x Combustível

Para que haja uma mistura ideal de carburante e comburente não basta apenas mesclar o ar e o combustível. Há uma necessidade de se conseguir uma boa vaporização desse carburante de forma que ele se misture muito bem com o ar.

Na combustão do carburante, se utilizam 12 partes de ar para 1 parte de combustível. Cabe lembrar que 1 quilo de ar ocupa um volume de 1 metro cúbico. Com isso chega-se a conclusão, com base na relação estequiométrica, que para queimar 1 quilo de combustível são necessários 12 quilos de ar (12:1). [13]

Na verdade existe uma proporção específica de comburente e combustível ideal, para cada tipo de motor. No caso do motor a gasolina a relação estequiométrica ideal está entre 9:1 e 10:1 (9 partes de ar para 1 quilo de combustível, no primeiro caso). Para o álcool etílico (etanol), a relação está entre 12:1 e 13:1 (12 partes de ar para 1 de combustível, para o primeiro caso). Essa proporção está intimamente ligada à quantidade de hidrogênio e carbono presente em uma determinada quantia de carburante. Caso haja menos ar do que a proporção ideal, há sobra de combustível, que indica riqueza da mistura. Isso não é um bom sinal, pois além do gasto excessivo de combustível, há também um lançamento maior de poluição no meio ambiente e o motor pode funcionar de forma irregular (“afoga”), desliga (“apaga”) ou pode não dar a partida. Se ocorrer o contrário, a mistura obtiver mais ar do que a proporção ideal (excesso de oxigênio), essa mescla é considerada pobre. Esta possui mais desvantagens, pois além de gerar mais poluentes de óxido de nitrogênio (óxido e o dióxido de nitrogênio), pode provocar também um desempenho inferior ao normal, não dar a partida e até danificar o motor. [13]

2.3.5. Fator Lambda

Para medir a relação estequiométrica utiliza-se o fator lambda, que é o quociente da mistura ar/combustível real pela ideal. O valor ideal do fator λ é igual a 1.

$$\lambda = \frac{mistura\ real}{mistura\ ideal} \quad (3)$$

Note que esta é uma situação que varia de acordo com o combustível utilizado no motor. Logo abaixo são apresentados os valores ideais de cada combustível para cada parte de ar utilizado no motor ciclo Otto. [13]

Gasolina com 20% de álcool: 9:1;

Álcool 12:1

Em um motor a gasolina, por exemplo, que recebe uma mistura de 10:1 (pobre) é possível encontrar o valor do fator lambda. Basta dividir aquele valor por 9:1 (ideal para gasolina), conforme demonstrado logo abaixo: [13]

$$Fator\ lambda\ \lambda = \frac{10}{9} = 1{,}1$$

Na partida a frio e nas acelerações o motor necessita de uma mistura admitida mais rica, sendo, portanto, necessário um fator lambda abaixo de 1 $(\lambda < 1)$. Entretanto, em casos a parte a esses, o conjunto admite uma mistura que se aproxima do fator lambda igual 1 $(\lambda = 1)$, onde há uma economia significativa e uma combustão próxima da ideal (queima total do combustível e a melhor marcha lenta).

Em outra situação, como a demonstrada anteriormente, o motor pode consumir pouco combustível e gerar potência reduzida. Este é o caso em que se obtém mistura pobre, isto é, um lambda maior que 1 $(\lambda > 1)$. [13]

A tabela 9 esquematiza de maneira simples e reduzida o que foi apresentado.

Tabela 9 – Relação do fator lambda e o tipo de mistura. [13]

Fator lambda λ	Tipo de mistura	Quantidade de ar
> 1	Pobre	Excesso
$= 1$	Ideal	Ideal
< 1	Rica	Falta

Fonte: [Estudos dos processos fisicos envolvidos nos motores que utilizam como combustivel álcool e gasolina (ciclo otto)].

Os motores que utilizam álcool ou gasolina atuam melhor com o fator lambda próximo a $\lambda = 1$, pois este é o ponto em que se obtém o maior torque associado ao menor consumo e menor emissão de poluentes. A tabela 10 expressa esta situação de forma a resumida.

Tabela 10 – Relação do desempenho do motor e o fator lambda. [13]

Desempenho do motor	$\lambda = 1$	Quantidade de ar
Plena carga	0,9	Excesso
Carga parcial	1	Ideal
Marcha lenta	0,9 a 1,05	Variavel

nte: [Estudos dos processos fisicos envolvidos nos motores que utilizam como combustivel álcool e gasolina (ciclo otto)].

3. MATERIAIS E MÉTODOS

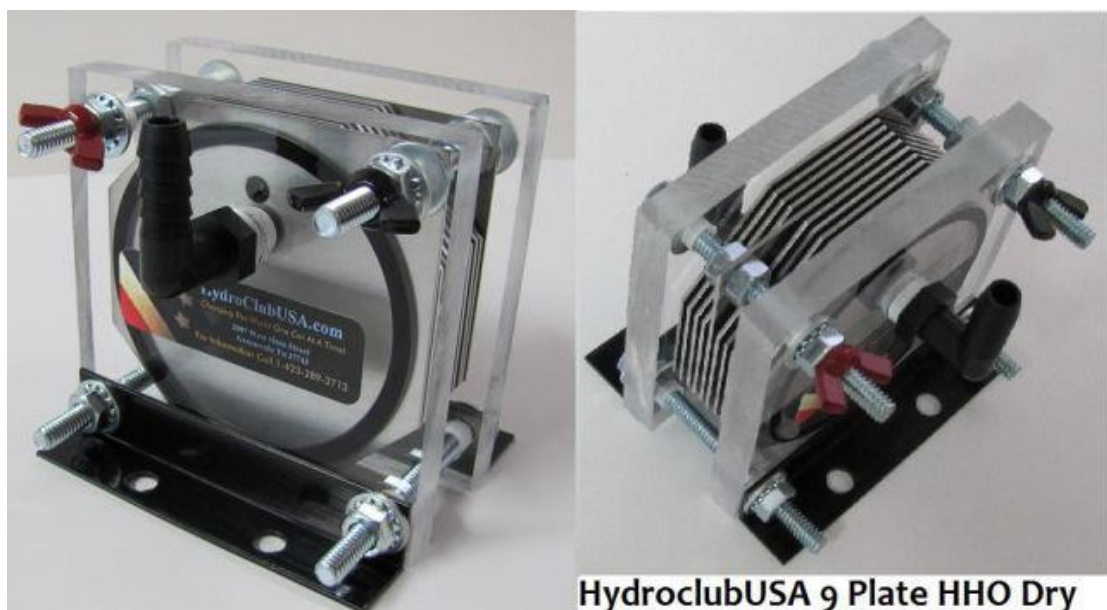
Nessa seção, serão apresentados os experimentos realizados a fim de comparar os dados de potencia, emissão de poluentes e eficiência do sistema, todos estes mostrados em antes e após a instalação do gerador de hidrogênio. Para o desenvolvimento desses experimentos, foram necessários alguns equipamentos descritos a seguir.

Salienta-se, que a abordagem dos testes será embasada na teoria revisada no capítulo 2. Será adotada essa metodologia, pois conjuga dados teóricos e práticos resultando em valores possíveis de análise e discussão.

3.1. Gerador de hidrogênio por eletrólise

3.1.1. O que é um gerador de hidrogênio por eletrólise

Será utilizado o nome comercial *Hydrocell* para gerador de hidrogênio por eletrólise. Uma *Hydrocell* conforme figura 11, é um dispositivo eletro químico que através da eletrólise segura de uma solução liquida de água (H_2O), associado a um sal como hidróxido de potássio (KOH), transforma os elementos presentes nessa solução, hidrogênio e oxigênio em gás. Para facilitar o entendimento utilizaremos a expressão HHO, que nada mais é do que duas moléculas de H mais uma de O em meio gasoso.

Figura 11 – *Hydrocell* para HHO.

Fonte: [Manual de instalação *Converted* do fabricante *HydroclubUSA*]

O gás HHO é direcionado através de mangueiras para a entrada de ar dou MCI onde será queimado na câmara de combustão como um gás auxiliar de queima, desta maneira substituindo em partes o combustível do veículo. Segundo a empresa HIDROCLUBUSA, fabricante da *Hydrocell*, com este equipamento é possível aumentar a eficiência do motor, poupando assim combustível, diminuir a temperatura de funcionamento e diminuir drasticamente a emissão de poluentes. Segundo a empresa o motor de seu veículo só precisa de uma quantidade pequena de HHO para atender os resultados esperados. [11]

3.1.2. Componentes do Kit para geração de hidrogênio

O kit *Hydrocell* conforme mostrado na figura 12 é composto por diversos componentes entre eles ligações hidráulicas e elétricas que serão descritos a seguir.

Figura 12 – Kit de instalção da *Hydrocell* HHO.

Fonte: [Manual de instalação *Converted* do fabricante *HydroclubUSA*]

3.1.2.1. Borbulhador

A figura 13 mostra o reservatório de água ou borbulhador. Este reservatório possui aproximadamente o volume de um litro, construído em material plástico é resistente à oxidação da solução eletrolítica. Tem por função armazenar a solução eletrolítica e reter as bolhas dos gases H e O a fim de direcioná-los para a sua utilização final. [11]

Figura 13 – Reservatório ou borbulhador.

Fonte: [Manual de instalação *Converted* do fabricante *HydroclubUSA*]

3.1.2.2. Filtro

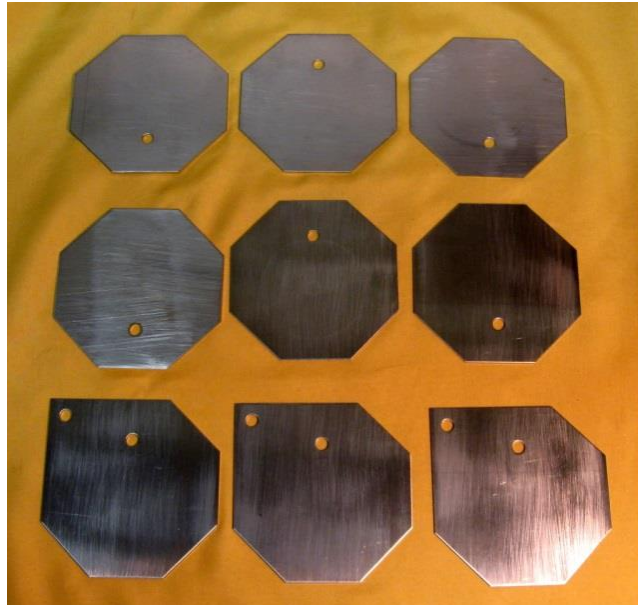
O filtro conforme mostrado na figura 14, tem as mesmas características que o borbulhador, porém este recipiente separa completamente o gás HHO de improváveis bolhas que possam conter líquido. O orifício abaixo no centro do reservatório permite drenar a parte líquida, a função do filtro é muito importante, pois vai impedir que líquidos entrem no motor do veículo. [11]

Figura 14 – Reservatório de filtro.

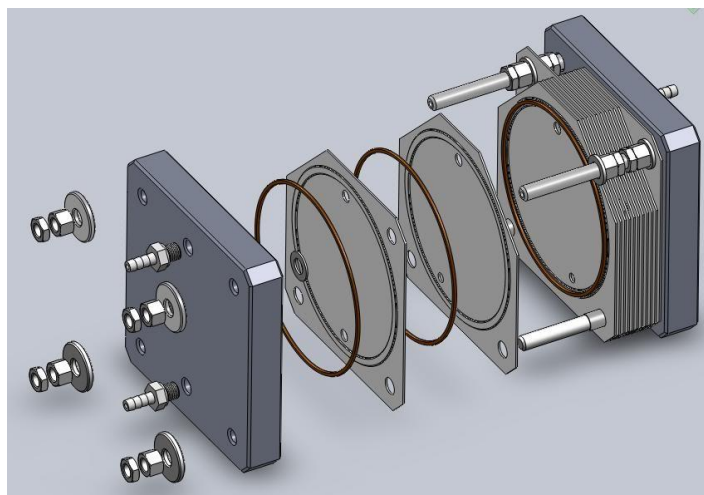
Fonte: [Manual de instalação *Converted* do fabricante *HydroclubUSA*]

3.1.2.3. Hydrocell

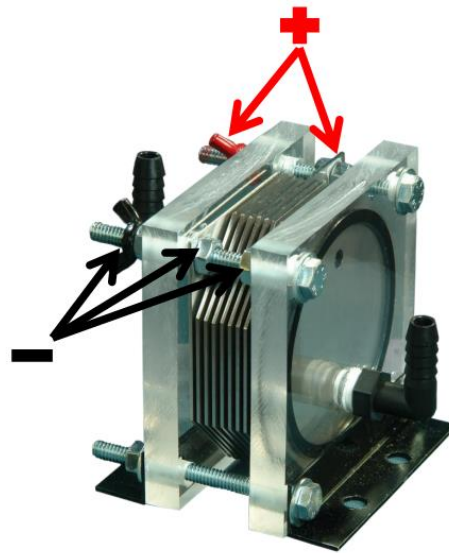
Chegamos ao componente de maior importância na geração de gás HHO. Nosso gerador de hidrogênio por eletrólise, que comercialmente chamamos de *Hydrocell*, mostrada na figura 11, é feito com nove placas de aço inoxidável 316L.

Figura 15 – Placas em aço inox 316L.

Fonte: [Manual de instalação *Converted* do fabricante *HydroclubUSA*]

Os componentes são montados conforme esquema abaixo

Figura 16 – Esquema de montagem da *Hydrocell*.

Fonte: [Manual de instalação *Converted* do fabricante *HydroclubUSA*]

A figura 15 ilustra o formato das placas de medidas de 4”x4”x2” o que é suficiente para produzir 2,25l/min de gás HHO. As placas são isoladas e vedadas umas entre as outras por uma borracha e montadas conforme figura 16.

Figura 17 – Alimentação elétrica da *Hydrocell*.

Fonte: [Manual de instalação *Converted* do fabricante *HydroclubUSA*]

3.1.2.4. Chip Eletrônico Volo

O chip FS2 conforme mostrado na figura 18, do fabricante Volo performance foi especialmente desenvolvido para as necessidades dos veículos equipados com gerador de hidrogênio . O FS2 é dinâmico, ele mede os níveis de oxigênio nos gases de escape, juntamente com a velocidade e carga do motor, a temperatura do ar de admissão e de volume, e muitas outras variáveis para determinar a taxa de fornecimento de combustível mais eficiente. [12]

Ao utilizar HHO como um suplemento do combustível, o FS2 ajusta o fornecimento de combustível para aperfeiçoar a eficiência. Quando HHO está desativado, o FS2 automaticamente se reajusta e muda para mapas altamente eficientes, aprimorados não HHO. [12]

O FS2 é um veículo específico com programa personalizado e micro controlador 20 de MHz. Ele utiliza a sua alta velocidade de entrada / saída para se comunicar diretamente com a ECU através da porta OBD- II série. O FS2 é compatível com todos os fabricantes, motores

diesel, Flex, sistemas de HHO suplemento e equipados com Turbo/ compressores, porém não é compatível com opções de motores híbridos, propano ou de gás natural. [12]

Figura 18 – *Chip Volo Performance FS2*.

Fonte: [Manual de instalação *Converted* do fabricante *HydroclubUSA*]

3.1.2.5. Amperímetro digital

O amperímetro digital conforme mostrado na figura 19, é um instrumento utilizado para fazer a medida da intensidade no fluxo da corrente elétrica que passa através da sessão transversal de um condutor e tem como função informar visualmente, para que o condutor possa corrigir o eletrólito caso a corrente seja maior ou menor que 15 Ampére.

Figura 19 – Amperimetro digital 50 ampéres.

Fonte: [Manual de instalação *Converted* do fabricante *HydroclubUSA*]

3.1.2.6. Relé

O relé mostrado na figura 20 nos permite usar uma pequena corrente para ligar ou desligar o gerador de hidrogênio. O relé é um dispositivo eletromecânico ou não, com inúmeras aplicações possíveis em comutação de contatos elétricos. Este relé apresenta quatro terminais que devem ser usados conforme abaixo: [11]

- Terminal 86 = Deve ser ligado na carroceria como negativo.
- Terminal 85 = Deve ser ligado na alimentação da bomba de gasolina.
- Terminal 87 = Deve ser ligado no terminal positivo do gerador de hidrogênio.
- Terminal 30 = Deve ser ligado no porta-fusíveis e para a bateria.
- Terminal 87ª = Manter desligado.

Figura 20 – Relé automotivo.

Fonte: [Manual de instalação *Converted* do fabricante *HydroclubUSA*]

3.1.2.7. Fusível

Na verdade o fusível mostrado na figura 21 é um disjuntor. Este disjuntor será ligado ao porta-fusível como um fusível normal, mas se mais de 30 ampères atingir a linha o disjuntor vai desarmar e reiniciar automaticamente em poucos segundos. Isso evita que mais de 30 ampères que viajam através do seu sistema e também elimina a necessidade de mudar fusíveis queimados.

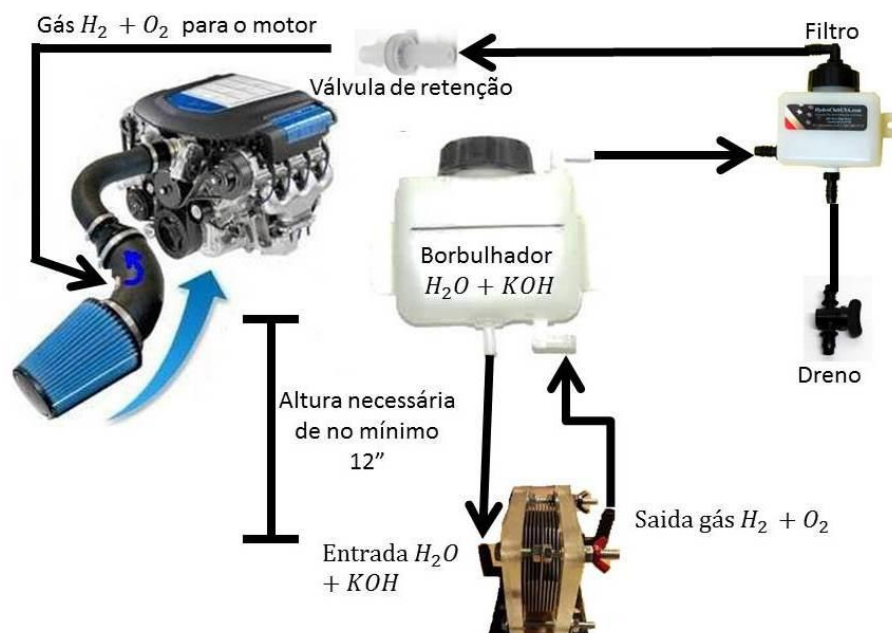
Figura 21 – Disjuntor Lamina.

Fonte: [Manual de instalação *Converted* do fabricante *HydroclubUSA*]

3.1.2.8. Funcionamento do kit *hydrocell*

Para explicação do funcionamento do gerador de hidrogênio por eletrolise, será dividido em duas partes, sendo hidráulica e elétrica.

A figura 22 mostra o esquema de montagem da parte hidráulica.

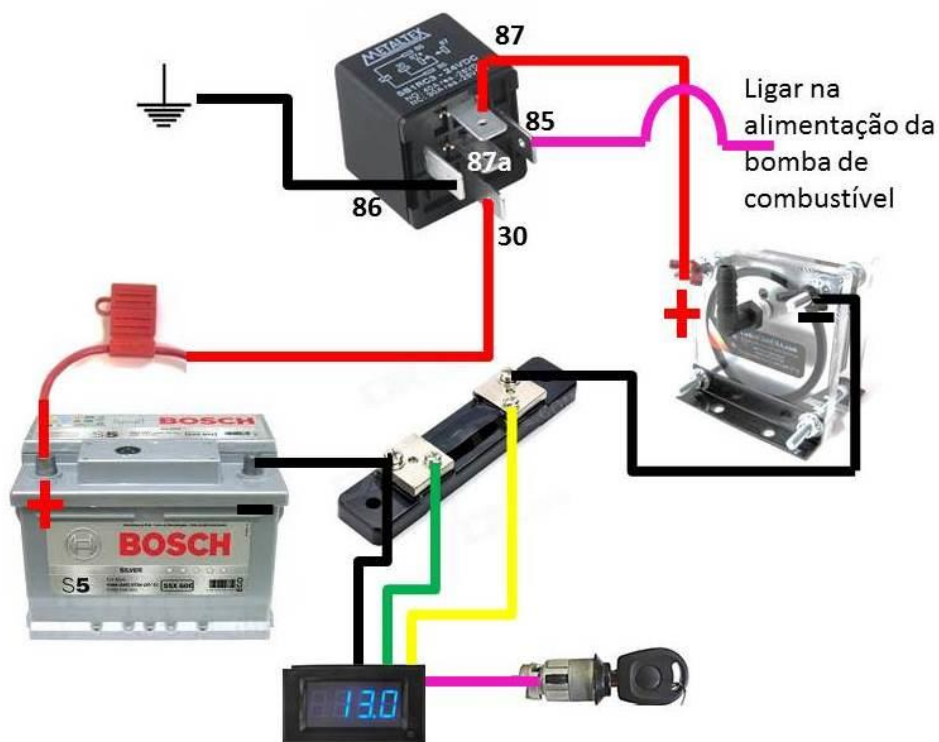
Figura 22 – Esquema de montagem hidráulica.

Fonte: [Autor]

O borbulhador deve ficar no mínimo a 12” de altura em relação ao gerador de hidrogênio, por meio da gravidade a solução aquosa de água e sal, o eletrólito descerá até o

gerador. As setas pretas representam a tubulação em mangueira de borracha ¾" e o sentido de circulação da solução. Ao chegar ao gerador à solução aquosa sofre o processo de eletrólise conforme explicado no capitulo 2.2, e sai em forma de bolhas de gás H_2 e O_2.

As bolhas misturadas com o eletrólito sobem novamente ao reservatório inicial onde se separam por completo, neste ponto o gás é direcionado ao filtro, este por sua vez irá reter qualquer quantidade de eletrólito que possa chegar até este ponto. Do filtro o gás HHO vai ser direcionado a aspiração de ar do veículo onde a sucção do motor é responsável pela circulação do gás no interior do sistema

A segunda parte para o funcionamento do equipamento é as ligações elétricas. A figura 23 mostra o esquema e seus componentes.

Figura 23 – Esquema elétrico de alientação do gerador.

Fonte: [Autor]

3.1.3. Veiculo em teste

Para os testes que serão apresentados a seguir será utilizado o automóvel conforme mostrado na figura 24 do fabricante Chevrolet, modelo Corsa Wind Hatch Super, motor 1.0 EFI 8V, com 60HP de potência, ano de fabricação 2000, atualmente com 88.000km.

Figura 24 – Corsa Wind Hatch Super, 1.0 EFI 8V, 60HP, ano de fabricação 2000

Fonte: [Autor]

3.1.4. Kit para geração de hidrogênio

O kit para geração de hidrogênio juntamente com todos os seus componentes conforme mostrado na figura 12 foi adquirido do fabricante americano HIDROCLUBUSA a um custo de U$328,71 mais U$53,82 de frete, totalizando assim o valor de R$841,56.

Este kit foi instalado conforme manda o fornecedor e está representado nas figuras 25, 26 e 27.

Figura 25 – Chip Volo Performance.

Fonte: [Autor]

O chip Volo para controle da injeção eletrônica foi instalado em um suporte próximo a porta OBD do veiculo, e para preservar as características físicas do interior do automóvel, foi instalado o relé e o amperímetro digital dentro do porta luvas.

Figura 26 – Instalação do relé e amperimetro digital.

Fonte: [Autor].

Figura 27 – Componentes hidráulico montados no motor do veículo teste.

Fonte: [Autor].

3.1.5. Analisador de gases PGA-500

O Analisador de gases PGA-500 conforme mostrado na figura 28 é um moderno equipamento baseado em plataforma Windows sete, especialmente desenvolvido para uso em Centros de Inspeção Oficial, como também em oficinas de reparação automobilística. O equipamento é capaz de efetuar medições de Rotação (RPM), Temperatura (ºC), Lambda, Relação Ar Combustível (AFR), Oxigênio (O_2), Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Carbono (CO_2), Hidrocarbonetos (HC), CO corrigido (CO cor) e Diluição (%CO+CO_2) de veículos com motores a álcool, gasolina ou gás natural veicular (GNV), utilizando a tecnologia infravermelha não dispersiva.

O PGA-500 possui um banco de dados de veículos, e os testes são avaliados de acordo com os limites oficiais pré-estabelecidos para o ano de fabricação do veiculo em teste. Além disso, o programa também possui um banco de dados de armazenamento das inspeções realizadas em modo oficial.

Os dados deste teste serão apresentados também como anexo em modo de laudo aprovado pelo INMETRO.

Figura 28 – Analizador de gases PGA-500 fabricante SUN.

Fonte: [Manual de operação, Snep-on Brasil].

3.1.6. Dinamômetro de rolos Dynotec 720i

Este sistema de ensaio conforme mostrado nas figuras 29 e 30 é o mais sério que existe para a medição de potência e é usado pelas equipes de competições de todo o

mundo. Seu fundamento, parte do princípio de inercia, tão antigo como a própria física, mais fácil de aplicar a medição de potência desde o uso massivo dos computadores.

Outro dos detalhes sobressalentes deste método a capacidade de medir a potência de perda absorvida pelos elementos da caixa de cambio e o conjunto de da transmissão. Esta medição se realiza na fase de desaceleração do ensaio.

Figura 29 – Veiculo teste em prova de torque e potência.

Fonte: [Autor].

Dados de ensaio.

- Potência no virabrequim, na roda e potência de perda (cada 25 rpm).
- Torque no virabrequim e na roda (cada 25 rpm).
- Análise de área de cada prova.
- Sistema de corrida, medições em metros e em tempo, simulação de arrancada.
- Cálculo das diferenças de velocidade.
- Potencia instantânea.

- Potencias media de cada item (único software com essa vantagem, muito importante para uma medição correta).
- Análise simultânea de até 10 provas.
- Ventilador de ar progressivo junto com aceleração.
- Sistema lambda em tempo real em gráficos e números (opcional banda larga).
- Estação barométrica digital e automática.
- Variador de frequência de 10 hp.
- Interface com entrada para 05 sensores auxiliares.
- Raque completo para disponibilidade do computador móvel.

(Opcionais) O software permite colocar até 4/5 sensores auxiliares, Ex: pressão de óleo, temperatura, velocidade de ar, temperatura de ar, etc.

Figura 30 – Softwar do dinamômetro de rolos DYNOTC 700i.

Fonte: [Autor].

O processo de calibração do sistema do Dynotec 700 i é feito a dois mil giros do motor, em terceira ou quarta marcha conforme preferência. No teste é engatada a primeira marcha e acelerado devagar até a marcha escolhida; a partir deste momento é dada

aceleração máxima até seis mil giros ou giro desejado; a partir deste ponto o veículo deve ser desengatado. O equipamento deve parar sozinho e em momento algum deve ser freado.

3.2. Experimentos com e sem o gerador de hidrogênio

Para melhor entendimento do leitor, os testes relacionados a seguir serão apresentados em forma de tabela sempre relacionando os resultados com e sem o gerador de hidrogênio.

3.2.1. Ensaio de emissão de poluentes

Os ensaios de emissão de poluentes foram realizados no laboratório da UNIJUÍ - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, juntamente com o responsável pelo testes com o equipamento. A primeira bateria de testes foi elaborada com o veículo funcionando somente com gasolina e os dados concebidos no teste serão apresentados na tabela 11. A tabela apresenta a média dos testes e os limites superiores e inferiores calculados pelo desvio padrão das amostras.

Tabela 11 – Teste de emisão de poluentes no veículo original.

TESTE EMISÃO DE POLUENTES - ORIGINAL								
ITEM DE INSPEÇÃO	**LIMITES**	**LENTA**	**INF.**	**SUP**	**2500 RPM**	**INF.**	**SUP.**	**RESULTADO**
CO corrigido % vol.	1	0,35	0,26	0,44	0,30	0,21	0,40	APROVADO
Fator Diluição	2,5	1,54	1,18	1,90	1,06	1,04	1,07	APROVADO
HC hexano (ppm vol.)	700	134	98	169	54	35	74	APROVADO
CO % vol	-------	0,23	0,21	0,24	0,29	0,20	0,38	-------
CO2 % vol.	-------	9,83	7,77	11,89	13,97	13,76	14,17	-------
HC hexano (ppm vol.)	-------	90	57	123	52	32	71	-------
Temperatura do óleo ºC	-------	95	93	97	97	95	99	-------
Rotação/Var. Motor (RPM)	2300/2700	959	957	960	2512	2490	2534	APROVADO

Fonte: [Autor].

A Segunda bateria de testes foi elaborada com o veículo funcionando com gasolina e hidrogênio e os dados concebidos no teste serão apresentados na tabela 12. A tabela apresenta a média dos testes e os limites superiores e inferiores calculados pelo desvio padrão das amostras.

Tabela 12 – Teste de emisão de poluentes no veículo com adição de H_2.

TESTE EMISÃO DE POLUENTES - ADIÇÃO DE H2								
ITEM DE INSPEÇÃO	**LIMITES**	**LENTA**	**INF.**	**SUP**	**2500 RPM**	**INF.**	**SUP.**	**RESULTADO**
CO corrigido % vol.	1	0,16	0,16	0,17	0,29	0,08	0,51	APROVADO
Fator Diluição	2,5	0,99	0,98	1,00	0,99	0,98	0,99	APROVADO
HC hexano (ppm vol.)	700	39	4	73	24	3	44	APROVADO
CO % vol	-------	0,16	0,16	0,17	0,29	0,08	0,51	-------
CO2 % vol.	-------	15,05	14,90	15,20	14,90	14,59	15,20	-------
HC hexano (ppm vol.)	-------	63	49	78	48	26	71	-------
Temperatura do óleo ºC	-------	91	88	94	96	93	98	-------
Rotação/Var. Motor (RPM)	2300/2700	954	941	968	2502	2485	2519	APROVADO

Fonte: [Autor].

3.2.2. Ensaio de torque e potência

Os ensaios com o dinamômetro de rolos para detecção dos parâmetros de torque e potencia foram realizados na empresa COMERCIA DEBACCO – Pró Diesel em Santo Ângelo/RS juntamente com o responsável técnico pelo equipamento e os dados concebidos nos testes serão apresentados no gráfico da figura 31, com o veículo em estado original de trabalho e o gráfico da figura 32 com a adição de hidrogênio.

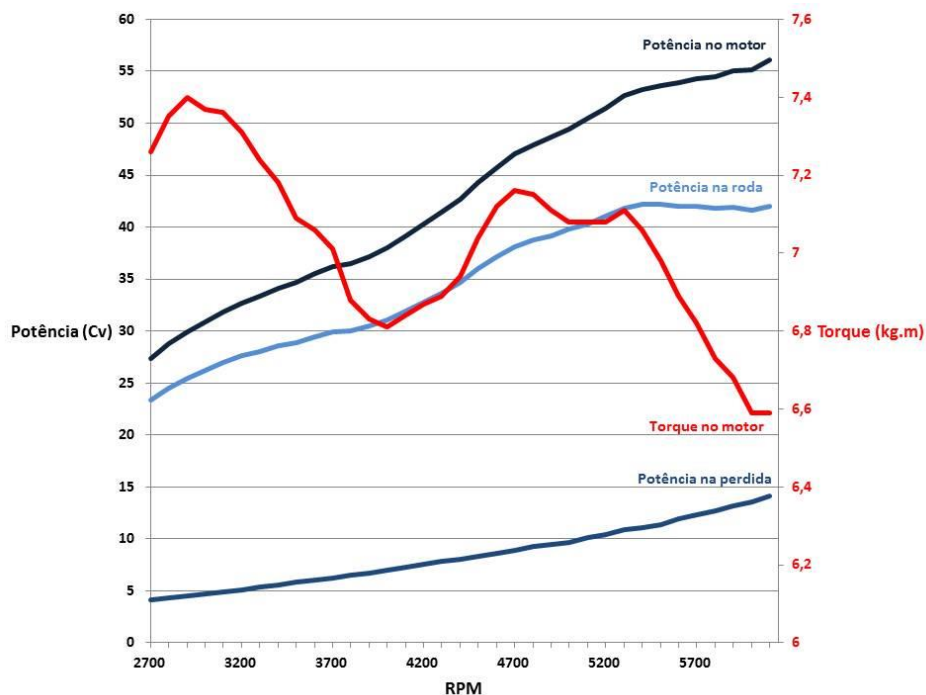
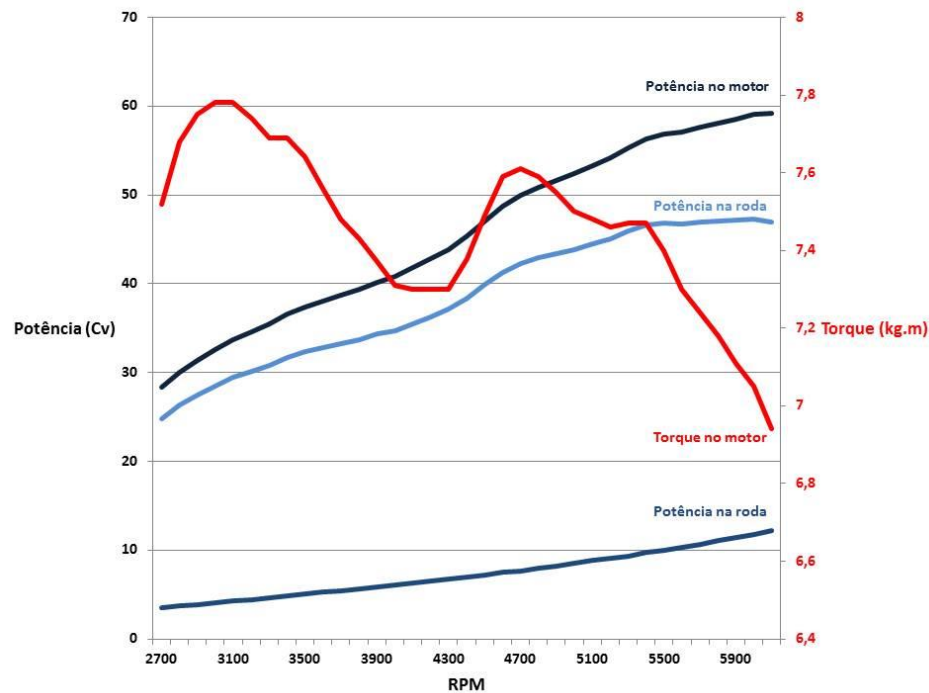
Figura 31 – Teste de Torque e Potência em relação a RPM sem H_2.

Fonte: [Autor].

Figura 32 – Teste de Torque e Potência em relação a RPM com H_2.

Fonte: [Autor].

3.2.3. Ensaio de consumo de combustível

Os ensaios de consumo foram efetuados durante os meses de setembro e outubro. Os valores coletados foram de forma manual, anotando a quilometragem percorrida até o momento do abastecimento completo. Os valores obtidos serão apresentados nas tabelas 13 e 14. Para o referido teste foi considerado alguns requisitos:

- ✓ Abastecimento com gasolina aditivada em postos com bandeira Petrobras.
- ✓ Abastecimento completo até o primeiro desligamento automático da bomba.
- ✓ Médias de quilometragem em rodovias e cidade.

Tabela 13 – Teste de consumo sem adição de H_2.

CONSUMO ORIGINAL	
Média km/L	11,610
Desvio Padrão km/L	1,886
Lim. Inferior km/L	9,724
Lim. Superior km/L	13,496

Fonte: [Autor].

Será apresentado a média dos testes e os limites superiores e inferiores calculados pelo desvio padrão das amostras. Os dados obtidos na tabela 13 correspondem a três amostras com uma soma total de 1350 km percorridos.

Os dados obtidos na tabela 14 correspondem a duas amostras com uma soma total de 400 km percorridos.

Tabela 14 – Teste de consumo com adição de H_2.

CONSUMO COM ADIÇÃO DE H_2	
Média km/L	16,599
Desvio Padrão km/L	2,269
Lim. Inferior km/L	14,331
Lim. Superior km/L	18,868

Fonte: [Autor].

4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

A relação entre prática e teoria muitas vezes sofrem divergências. Sabe-se que em situações práticas, muitos fatores tendem a distorcer os resultados obtidos na teoria. A coleta das amostras podem conter erros. O trabalho é buscar a fonte dos erros, e caso não seja possível minimiza-los, os mesmos devem ser identificados e quantificados.

Nesse contexto é que foram realizados os experimentos apresentados no capítulo 3.2, dos quais serão discutidos os resultados obtidos, procurando trazer uma interpretação clara e objetiva.

4.1. Experimento de emissão de poluentes

Como visto, a realização dos experimentos teve a finalidade de averiguar qual seria o comportamento da emissão de poluentes com a adição de H_2. Nesses experimentos, quando comparados os resultados das tabelas 11 e 12, foi possível verificar que o processo com adição de H_2 apresenta uma diminuição nos poluentes medidos, exceto para o monóxido de carbono. Também, ressalta-se que o veículo foi aprovado no teste de emissão de poluentes conforme itens controlados pelo INMETRO.

A tabela 15 apresenta o percentual médio de redução na emissão dos poluentes, os valores mostrados são as médias das somas dos limites inferiores e superiores da emissão de poluentes em marcha lenta e a 2500RPM. Com a análise das tabelas pode-se afirmar uma redução total média na emissão de poluentes de 24%.

Tabela 15 – Média total de variação de poluentes com adição de H_2.

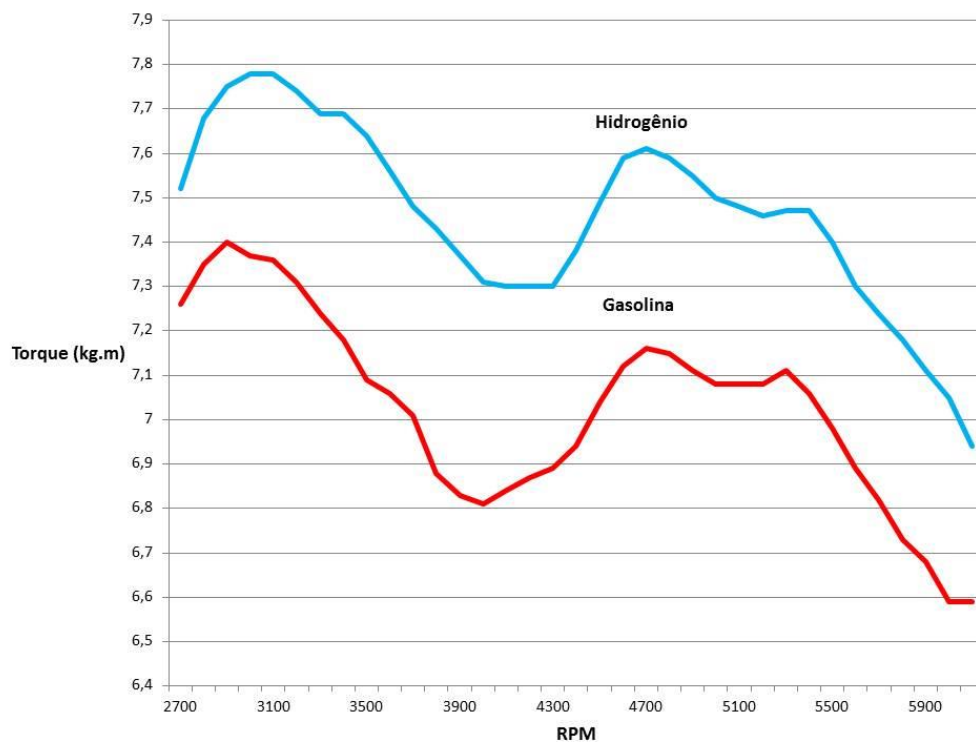
ITEM DE INSPEÇÃO	%
CO corrigido % vol.	-48%
Fator Diluição	-24%
HC hexano (ppm vol.)	-67%
CO % vol	-11%
CO2 % vol.	26%
HC hexano (ppm vol.)	-21%
Média total de redução	-24%

Fonte: [Autor].

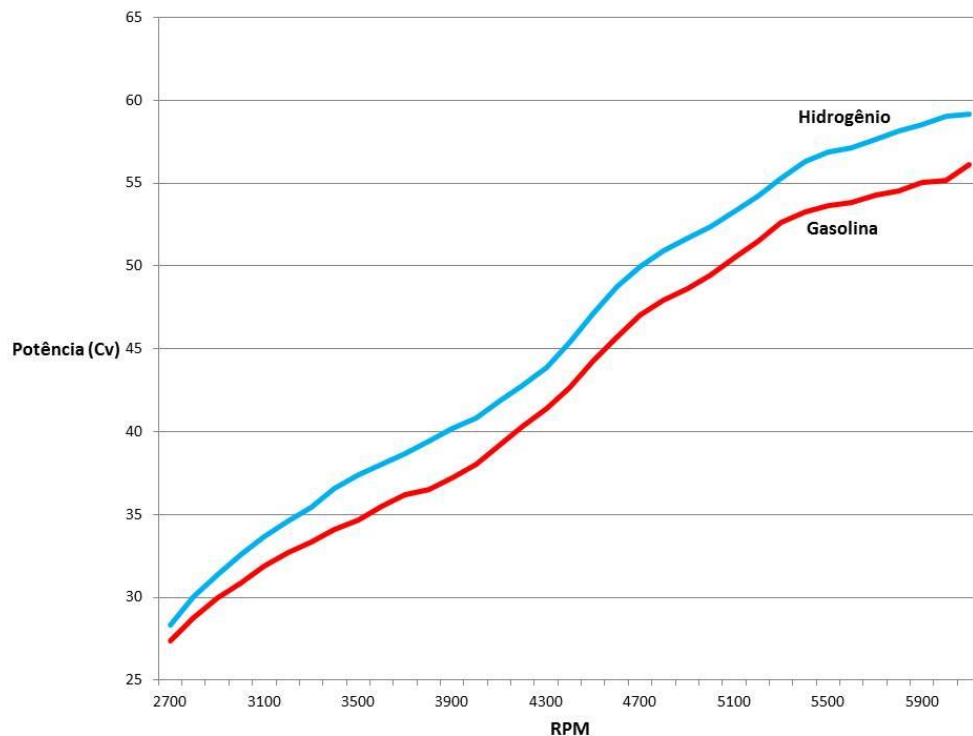
4.2. Experimento de torque e potência

O objetivo deste experimento foi verificar via condições de laboratório, a variação apresentada com adição de gás hidrogênio nos testes de potência e torque por RPM do motor testado.

Analisando os gráficos das figuras 33 e 34, podemos avaliar que com a adição de hidrogênio como gás de queima, diminui a amplitude e ameniza as curva da linha de torque. Também, podemos verificar que o aspecto das linhas de potência, é muito similar em ambos os gráficos apresentados. Para tornar essa diferença visível, vamos apresentar de forma separada os dados coletados para os testes com e sem hidrogênio.

Figura 33 – Comparativo de torque estre gasolina e adição de H_2.

Fonte: [Autor].

O gráfico apresentado na figura 33 mostra a diferença entre as curvas de torque com e sem a adição de H_2. Esta diferença representa um aumento de torque de 3,6 a 8% por faixa de RPM. O gráfico apresentado na figura 34 mostra a diferença entre as curvas de potência no motor com e sem a adição de H_2. Esta diferença representa um aumento de potência no motor de 3,5 a 8% por faixa de RPM.

Figura 34 – Comparativo de potência entre gasolina e adição de H_2.

Fonte: [Autor].

4.3. Experimento de consumo de combustível

Este experimento teve a finalidade de verificar o consumo médio de quilômetros por litro de combustível consumido. Analisando os dados coletados e apresentados nas planilhas 13 e 14, podemos verificar um aumento significativo nos quilômetros percorridos com um litro de combustível. O valor mínimo de ganho apresentado neste experimento varia de 6% até uma média de 43%. Desta forma pode-se concluir que a adição de hidrogênio nas condições de produção conforme estabelecidos pelo fabricante, melhora o desempenho do veiculo testado.

4.4. Discussão geral

Levando em consideração as melhorias apresentadas nos testes de emissão de poluentes, torque, potência e consumo seguem alguns fatos relevantes:

- ✓ O alternador do veículo produz carga em excesso, enquanto o gerador de hidrogênio apenas utiliza parte da capacidade extra, enquanto o veículo estiver em funcionamento.
- ✓ Motores de combustão interna sugam o ar a partir da atmosfera. Esse ar contém cerca de 80% de nitrogênio, o que é inútil para o veículo. Ele também contém cerca de 20% de oxigênio (existem vestígios de outros gases no ar, tais como argônio, dióxido de carbono, criptônio e outros gases, mas estas representam apenas cerca de 1% no total). Tudo o que estamos fazendo com o sistema de geração de hidrogênio é aumentar o nível de Oxigênio e melhorar o combustível da mistura, que é muito mais útil para a combustão.
- ✓ O gás H_2 e O são mais simples de construir do que a molécula de gasolina, eles atuam mais rapidamente e como um estimulante para inflamar a gasolina, mais cedo e de forma mais completa. O teor superior de oxigênio da mistura permite que mais gasolina queime o que também aumenta a eficiência. É como a adição de vento para o fogo.
- ✓ O gás H_2 e O tem uma taxa de compressão maior do que a gasolina, o que permite usar mais combustível. Quando HHO não está em uso, o combustível adicional não utilizado passa pelo motor e não queima completamente. Este efeito é o lodo que se forma sobre os pistões e suja as velas.
- ✓ O veículo com gerador de hidrogênio gera menos poluição porque o combustível hidrogênio mais eficiente regula a queima, uma vez que está combinando com o oxigênio que é mais valioso para a combustão, assim é queimada toda a gasolina. Um ciclo de combustão mais eficiente permite que você use menos combustível com a mesma definição do acelerador. Além disso, o aumento da eficiência permite um ajuste do acelerador mais baixo, para uma dada potência de produção e, portanto, reduz o consumo de combustível para um dado percurso.
- ✓ a queima do hidrogênio é mais rápida e gera mais turbulência, o que favorece a queima do combustível (gasolina), motivo pelo qual a medição de gases indicou uma diminuição do monóxido de carbono e aumento do dióxido de carbono.

CONCLUSÃO

O desenvolvimento do presente trabalho possibilitou o entendimento da necessidade da busca de combustíveis alternativos, para suprir necessidades futuras na indisponibilidade do petróleo e seus derivados.

O cenário atual mostra que essa busca será incessante e cada dia que passa novas pesquisas trazem tecnologias para tornar pratica a utilização de hidrogênio em veículos automotores; estas tecnologias vão desde células de hidrogênio até motores de combustão interna, específicos para queimar hidrogênio. Sabemos que o grande desafio está em desenvolver tecnologias baratas, seguras e de baixo custo para tal produção.

Ao realizar os experimentos práticos, ficou evidenciado a produção de hidrogênio por eletrólise da água e o seu consumo imediato como parte do combustível do veículo de teste. Mediante aos resultados obtidos, pode-se verificar uma melhoria quanto aos aspectos de emissão de poluentes, consumo de combustível, torque e potência.

Salienta-se que a utilização do hidrogênio será viabilizado aos poucos, e é uma tendência inevitável para o futuro, para manter em alta a prosperidade de nossos povos e ao mesmo tempo preservando o meio ambiente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] HARPER, GAVIN D. J. ***Fuel cell projects for the Evil Genius***. New York: McGraw-Hill, 2008. 208 p.

[2] SILVA, SARA. ***Hidrogênio como Alternativa - Do cepticismo à realidade***. Escola Superior Agrária de Santarém. Santarém, p. 35. 2010.

[3] ALDABÓ, RICARDO. ***Célula Combustível a Hidrogênio*: ** Fonte de energia da nova era. São Paulo - SP: Artliber, 2004.

[4] NETO, EMILIO H. G. ***Hidrogênio Evoluir Sem Poluir***. 1ª. ed. Curitiba: Brasil H2 Fuel Cell Energy, 2005. 240 p.

[5] ALMEIDA, A. T. ***Hidrogênio como Combustível***. Coimbra: Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2005.

[6] BOHACIK, T.S. De Maria and SAMAN, W.Y, 1996, ***constant volume adiabatic combustion of stoichiometric hydrogen oxygen mixtures***, Disponivel em: http://www.osti.gov/scitech/search.jsp. Acesso em 13 out. 2013.

[7] ***Hydrogen Properties***, College of the Desert, December 2001, Disponivel em: http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/tech_validation/pdfs/fcm01r0.pdf . Acesso em 20 out. 2013

[8] WHITE, CHRISTOPER, ***Advanced Hydrogen-Fueled Engines:Potential end Challenges***, University of New Hampshire, Sandia National Laboratories, ERC Symposium, June 2007.

[9] SARDELLA, Antonio; ***Curso Completo de Química***. São Paulo: Editora Ática, 2º Edição 1999.

[10] PANDEY, P.C. and SHAN, H.S. ***Modern Machining Processes***. Tata, McGraw-Hill, 1985.

[11] WADDELL, RICHIE. ***Converted:*** How to convert your vehicle into a hydrogen hybrid in about 3 hours and save. HydroClubUSA, 2011.

[12] **Volo performance inc.** Disponivel em: http://voloperformance.com/fs2hhoedition.html. Acesso em: 01 out. 2013.

[13] NASCIMENTO, JOEL H.S.; Estudos dos processos fisicos envolvidos nos motores que utilizam como combustivel álcool e gasolina (ciclo otto), Universidade Católica de Brasília, 2008.

ANEXO I

Teste de poluentes em condições normais do veículo.

PGA-500
Analisador de Gases

UNIJUI
Laboratório - LAMECO
Distrito Industrial II - SBO - SP
Fone: (19) 2108-1000
www.snapon.com.br

RESULTADO: VEÍCULO APROVADO **10/10/2013 16:18:01**

Cliente: FÁBIO WOLLMANN **Endereço:**
Bairro: **Cidade:**
CEP: **Telefone:**

Marca: GM	**Km Atual:** 88436	**Rotação:** 600 a 1200 / 2300 a 2700 RPM
Veículo: CORSA	**Chassi:**	**Variação Max. Rotação** 200 RPM
Modelo: 1.0 EFI WIND 8V	**Comb.:** Gasolina	**Prox. Inspeção:** 09/04/2014
Ano Fab.: 2000	**Tipo Ignição:** Simples	**Máquina:** 001
Placa: IJL-9237	**Escapamento:** Único	

ITEM DE INSPEÇÃO	LIMITES	MARCHA LENTA	2500 RPM	RESULTADO
Escapamento: 1		*Combustível: Gasolina*		
CO corrigido % vol.	1,00	0,45	0,41	APROVADO
Fator Diluição	2,50	1,95	1,04	APROVADO
HC corrigido (ppm vol.)	700	127	077	APROVADO
CO % vol.	---------	0,23	0,39	--------
CO2 % vol.	---------	7,45	14,02	--------
HC hexano (ppm vol.)	---------	065	074	--------
Temperatura do óleo °C	---------	93	95	--------
Rotação/Var. do Motor (RPM)	Veja Especificação Acima	960 / 030	2531	APROVADO

Operador: Snap-On *Versão do Software: 3.2.1.2* *Página: 1 de 1* *Teste: 000147*

ANEXO II

Teste de emissão de poluentes com adição de hidrogênio.

UNIJUI
Laboratório - LAMECO
Distrito Industrial II - SBO - SP
Fone: (19) 2108-1000
www.snapon.com.br

RESULTADO: VEÍCULO APROVADO **28/10/2013 18:02:45**

Cliente: FABIO WOLLMANN **Endereço:**
Bairro: **Cidade:**
CEP: **Telefone:**

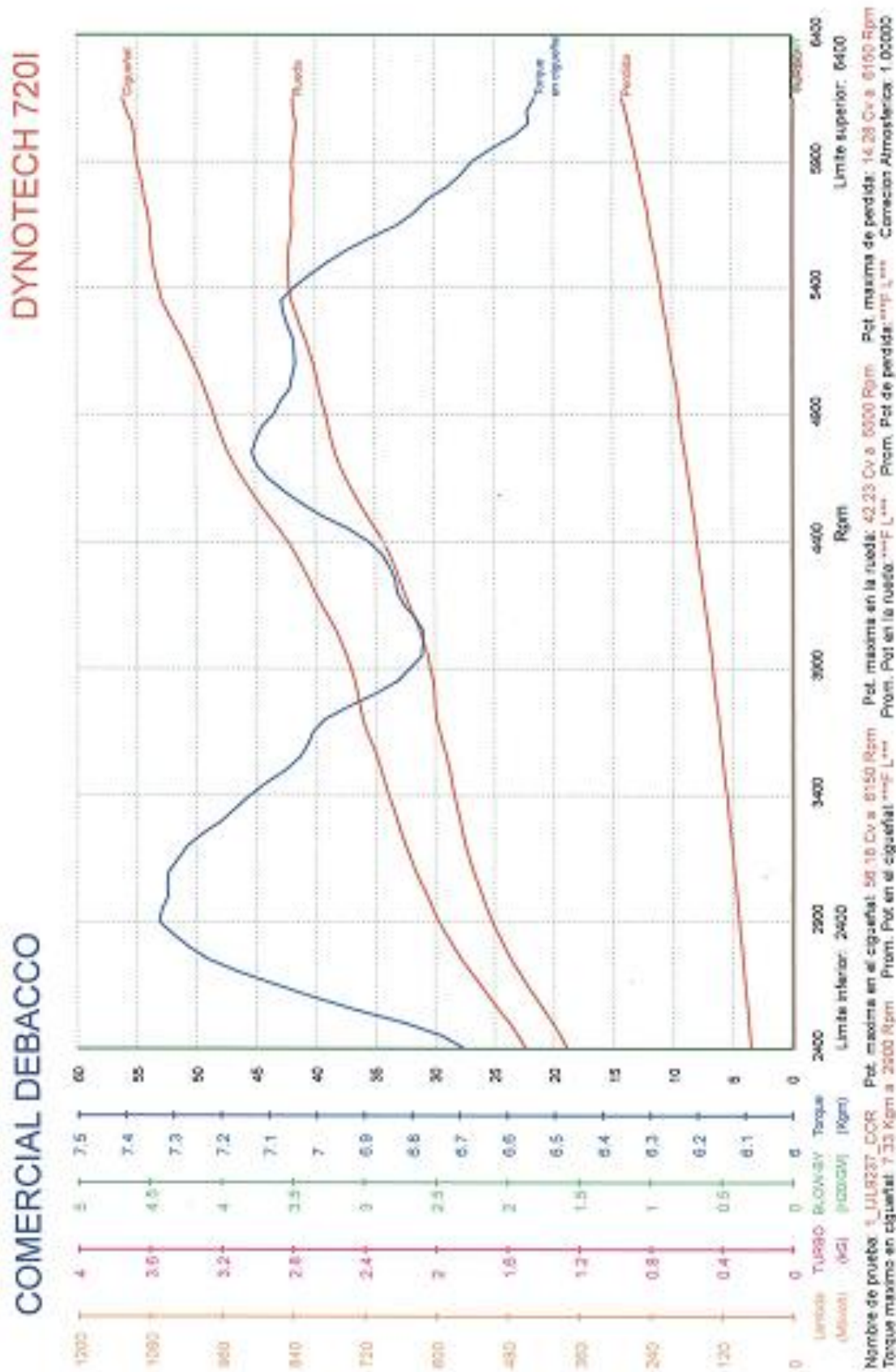
Marca: GM	**Km Atual:** 89377	**Rotação:** 600 a 1200 / 2300 a 2700 RPM
Veículo: CORSA	**Chassi:**	**Variação Max. Rotação** 200 RPM
Modelo: 1.0 EFI WIND 8V	**Comb.:** Gasolina	**Prox. Inspeção:** 27/04/2014
Ano Fab.: 2000	**Tipo Ignição:** Simples	**Máquina:** 001
Placa: IJL-9237	**Escapamento:** Único	

ITEM DE INSPEÇÃO	LIMITES	MARCHA LENTA	2500 RPM	RESULTADO
Escapamento: 1		***Combustível: Gasolina***		
CO corrigido % vol.	1,00	0,16	0,16	APROVADO
Fator Diluição	2,50	0,98	0,98	APROVADO
HC corrigido (ppm vol.)	700	047	031	APROVADO
CO % vol.	--------	0,16	0,16	--------
CO2 % vol.	--------	15,20	15,20	--------
HC hexano (ppm vol.)	--------	047	031	--------
Temperatura do óleo ºC	--------	92	96	--------
Rotação/Var. do Motor (RPM)	Veja Especificação Acima	964 / 050	2490	APROVADO

Operador: Snap-On *Versão do Software: 3.2.1.2* *Página: 1 de 1* *Teste: 000151*

ANEXO III

Teste de torque e potência em condições normais.

DYNOTECH 720I

COMERCIAL DEBACCO

Nombre de la Prueba	: 1_CORSABRANCO_IJL9237_00KK	Marca	: CORSABRANCO
Fecha y Hora	: jueves 17/10/13 02:03	Nro Patente	: IJL9237
Corrección atmosférica	: 1	Nº Motor	: 00KK
Relación Eje motor/freno	: 2.94	Cliente	: Fabio Wolmann
Presión atmosferica	: 760 MMhg	Comando	: std
Humedad	: 70 %	Variador de Avanço	: std
Temperatura ambiente	: 20 grados C	Bomba injetora	: no
Temperatura en la boca del carburador	: 20 grados C	Marcha	: 3 Terceira
Tipo de prueba	: Inercial Total	Observaçoes	: Teste Hidrogenio
Potencia promedio	: Entre 2400 y 6400 Rpm	Observaçoes	:

Pot. Promedio en Cigueñal: ***F L***
Pot. maxima en Cigueñal: 56.12 Cv a 6100 Rpm

Pot.promedio en rueda: ***F L***
Pot. maxima en rueda: 42.23 Cv a 5500 Rpm

Pot.promedio de perdida: ***F L***
Pot. maxima de perdida: 14.11 Cv a 6100 Rpm

Tabla de valores

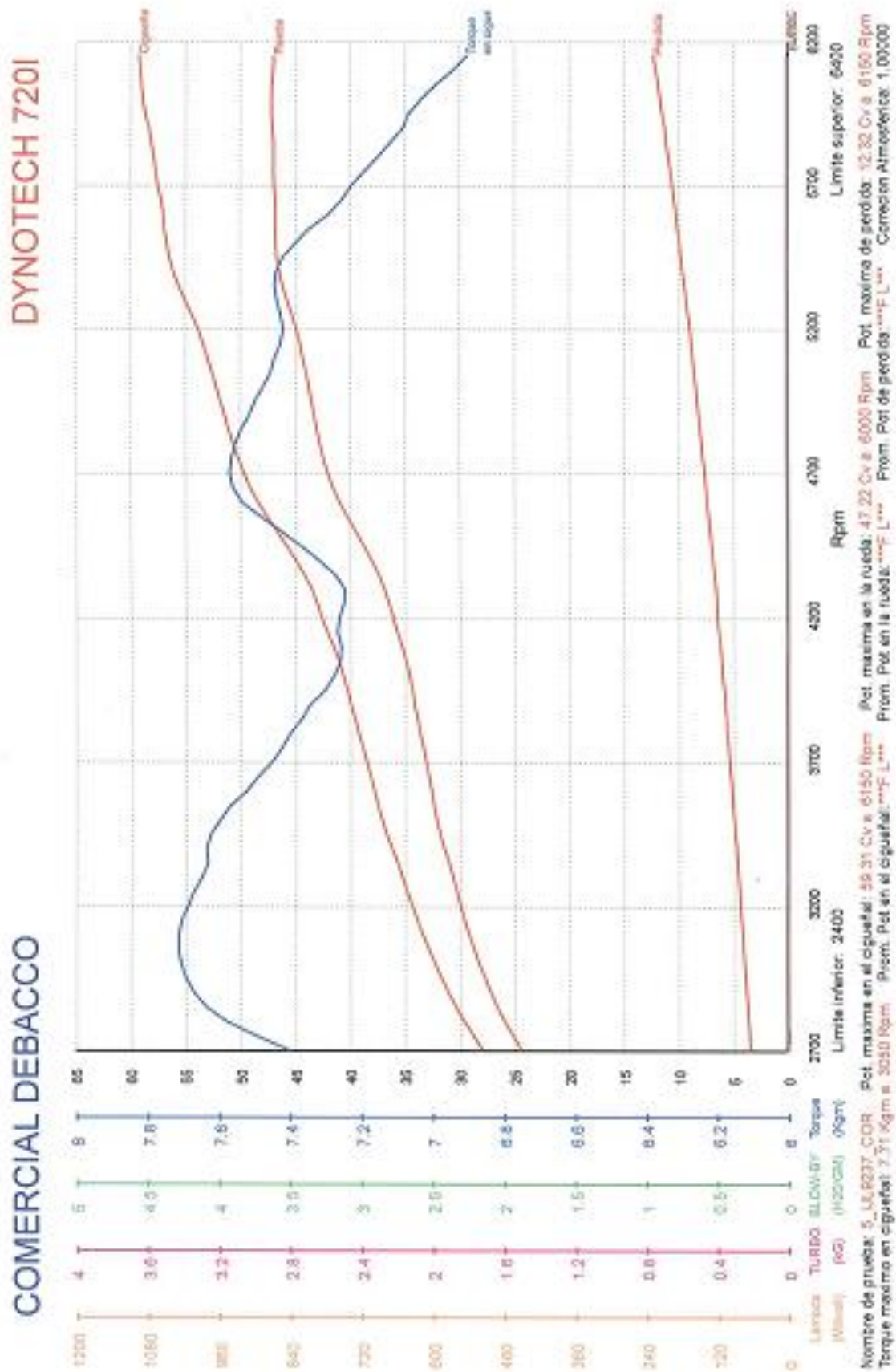
T. Aceleracion (Seg)	Rpm vehiculo	Rpm rodillo	Velocidad (Km/h)	torque en motor(Kgm)	torque en rueda(Kgm)	Potencia en motor(Cv)	Potencia en rueda(Cv)	Potencia de perdida(Cv)	Lambda Milivolt	TURBO kG	BLOW-BY H20/0M
21.39	6100	2075	105.60 Max	6.59	14.08	56.12 Max	42.01	14.11 Max	0.18	0.00	0.00
20.73	6000	2041	103.87	6.58	14.39	55.15	41.58	13.58	0.31	0.00	0.00
20.08	5900	2007	102.14	6.68	14.55	55.06	41.92	13.14	0.34	0.00	0.00
19.43	5800	1973	100.41	6.73	14.85	54.50	41.79	12.71	0.08	0.00	0.00
18.81	5700	1939	98.68	6.82	15.13	54.27	41.99	12.28	0.41	0.00	0.00
18.19	5600	1905	96.95	6.89	15.44	53.98	41.96	11.90	0.00	0.00	0.00
17.58	5500	1871	95.22	6.98	15.68	53.61	42.23 Max	11.38	0.00	0.00	0.00
16.99	5400	1837	93.49	7.06	16.07	53.27	42.16	11.11	0.00	0.00	0.00
16.41	5300	1803	91.76	7.11	16.37	52.63	41.79	10.84	0.49	0.00	0.00
15.83	5200	1769	90.03	7.08	16.61	51.46	41.06	10.40	0.00	0.00	0.00
15.25	5100	1735	88.30	7.08	16.63	50.45	40.33	10.12	0.21	0.00	0.00
14.68	5000	1701	86.57	7.08	16.63	49.43	39.80	9.64	0.14	0.00	0.00
14.10	4900	1667	84.84	7.11	16.73	48.63	39.17	9.46	0.40	0.00	0.00
13.54	4800	1633	83.11	7.15	16.85	47.95	38.73	9.21	0.00	0.00	0.00
12.98	4700	1599	81.38	7.16	16.96	47.02	38.14	8.89	0.08	0.00	0.00
12.42	4600	1565	79.65	7.12	17.09	45.72	37.14	8.58	0.21	0.00	0.00
11.85	4500	1531	77.92	7.04	17.06	44.27	35.97	8.30	0.15	0.00	0.00
11.29	4400	1497	76.19	6.94	16.88	42.67	34.63	8.05	0.44	0.00	0.00
10.71	4300	1463	74.46	6.89	16.62	41.41	33.60	7.81	0.27	0.00	0.00
10.13	4200	1429	72.73	6.87	16.45	40.30	32.77	7.53	0.00	0.00	0.00
9.55	4100	1395	71.00	6.84	16.43	39.18	31.92	7.26	0.00	0.00	0.00

DYNOTECH 720I

COMERCIAL DEBACCO

T. Aceleracion (Seg)	Rpm vehiculo	Rpm rodillo	Velocidad (Km/h)	torque en motor(Kgm)	torque en rueda(Kgm)	Potencia en motor(Cv)	Potencia en rueda(Cv)	Potencia de perdida(Cv)	Lambda Mixtur	TURBO kG	BLOW-BY H2O/OM
8.96	4000	1361	69.27	6.81	16.43	38.04	31.06	6.98	0.26	0.00	0.00
8.38	3900	1327	67.54	6.83	16.35	37.18	30.45	6.72	0.55	0.00	0.00
7.80	3800	1293	65.81	6.88	16.39	36.52	30.01	6.51	0.35	0.00	0.00
7.22	3700	1259	64.08	7.01	16.59	36.20	29.95	6.25	0.51	0.00	0.00
6.66	3600	1224	62.29	7.06	16.94	35.51	29.49	6.02	0.00	0.00	0.00
6.10	3500	1190	60.56	7.09	17.21	34.68	28.88	5.80	0.13	0.00	0.00
5.54	3400	1156	58.83	7.18	17.33	34.09	28.54	5.56	0.27	0.00	0.00
5.00	3300	1122	57.10	7.24	17.58	33.36	28.03	5.32	0.00	0.00	0.00
4.46	3200	1088	55.37	7.31	17.83	32.69	27.59	5.10	0.00	0.00	0.00
3.93	3100	1054	53.64	7.36	18.07	31.85	26.94	4.91	0.41	0.00	0.00
3.41	3000	1020	51.91	7.37	18.26	30.88	26.19	4.69	0.00	0.00	0.00
2.89	2900	986	50.18	7.40 Max	18.37	29.96	25.48	4.49	0.00	0.00	0.00
2.37	2800	952	48.45	7.35	18.45 Max	28.74	24.45	4.29	0.67	0.00	0.00
1.86	2700	918	46.72	7.26	18.42	27.39	23.31	4.08	0.18	0.00	0.00
1.34	2600	884	44.99	7.11	18.25	25.82	21.93	3.88	0.01	0.00	0.00
0.81	2500	850	43.26	6.93	17.84	24.20	20.49	3.70	0.02	0.00	0.00
0.27	2400	816	41.53	6.78	17.41	22.71	19.19	3.52	0.39	0.00	0.00

Limite Inferior

Teste de emissão de poluentes com adição de hidrogênio.

COMERCIAL DEBACCO

DYNOTECH 720I

Nombre de la Prueba	: 5_CORSABRANCO_IJL9237_00KK	Marca	: CORSABRANCO
Fecha y Hora	: sábado 26/10/13 09:14	Nro Patente	: IJL9237
Corrección atmosférica	: 1	Nº Motor	: 00KK
Relación Eje motor/freno	: 2.84	Cliente	: Fabio Wollmann
Presión atmosferica	: 760 MMHg	Comando	: std
Humedad	: 70 %	Variador de Avanço	: std
Temperatura ambiente	: 20 grados C	Bomba injetora	: no
Temperatura en la boca del carburador	: 20 grados C	Marcha	: 3 Terceira
Tipo de prueba	: Inercial Total	Observaçoes	: Teste Hidrogenio
Potencia promedio	: Entre 2400 y 6400 Rpm	Observaçoes	:

Pot. Promedio en Cigueñal: ***F L***
Pot. maxima en Cigueñal: 59.16 Cv a 6100 Rpm

Pot.promedio en rueda: ***F L***
Pot. maxima en rueda: 47.23 Cv a 6000 Rpm

Pot.promedio de perdida: ***F L***
Pot. maxima de perdida: 12.22 Cv a 6100 Rpm

Tabla de valores

T. Aceleracion (Seg)	Rpm vehiculo	Rpm rodillo	Velocidad (Km/h)	torque en motor(Kgm)	torque en rueda(Kgm)	Potencia en motor(Cv)	Potencia en rueda(Cv)	Potencia de perdida(Cv)	Lamda Milivolt	TURBO KG	BLOW-BY H20/GM
17.98	6100	2075	105.60 Max	6.94	15.84	59.16 Max	46.94	12.22 Max	0.48	0.01	0.00
17.39	6000	2041	103.87	7.05	16.17	59.04	47.23 Max	11.81	0.37	0.01	0.00
16.81	5900	2007	102.14	7.11	16.49	58.55	47.15	11.40	0.06	0.01	0.00
16.24	5800	1973	100.41	7.18	16.77	58.13	47.01	11.12	0.25	0.01	0.00
15.68	5700	1939	98.68	7.24	16.97	57.61	46.98	10.63	0.58	0.01	0.00
15.13	5600	1905	96.95	7.30	17.30	57.10	46.76	10.34	0.00	0.01	0.00
14.58	5500	1871	95.22	7.40	17.52	56.86	46.86	10.00	0.62	0.01	0.00
14.05	5400	1837	93.49	7.47	17.84	56.31	46.58	9.73	0.71	0.01	0.00
13.52	5300	1803	91.76	7.47	18.14	55.28	45.93	9.35	0.00	0.01	0.00
12.99	5200	1769	90.03	7.46	18.27	54.19	45.10	9.09	0.25	0.01	0.00
12.47	5100	1735	88.30	7.48	18.24	53.26	44.45	8.81	0.00	0.01	0.00
11.95	5000	1701	86.57	7.50	18.29	52.36	43.85	8.51	0.62	0.01	0.00
11.43	4900	1667	84.84	7.55	18.44	51.65	43.42	8.23	0.35	0.01	0.00
10.92	4800	1633	83.11	7.59	18.61	50.89	42.90	7.99	0.18	0.01	0.00
10.41	4700	1599	81.38	7.61	18.77	49.93	42.24	7.68	0.55	0.01	0.00
9.90	4600	1565	79.65	7.59	18.90	48.78	41.29	7.49	0.14	0.01	0.00
9.40	4500	1531	77.92	7.49	18.93	47.08	39.89	7.19	0.08	0.01	0.00
8.89	4400	1497	76.19	7.38	18.72	45.38	38.41	6.97	0.41	0.01	0.00
8.37	4300	1463	74.46	7.30	18.44	43.85	37.13	6.73	0.52	0.01	0.00
7.84	4200	1429	72.73	7.30	18.20	42.81	36.26	6.55	0.01	0.01	0.00
7.31	4100	1395	71.00	7.30	18.16	41.81	35.51	6.31	0.28	0.00	0.00

DYNOTECH 720I

COMERCIAL DEBACCO

T. Aceleracion (Seg)	Rpm vehiculo	Rpm rodillo	Velocidad (Km/h)	torque en motor(Kgm)	torque en rueda(Kgm)	Potencia en motor(Cv)	Potencia en rueda(Cv)	Potencia de perdida(Cv)	Lambda Millivolt	TURBO kG	BLOW-BY H2O/CM
6.79	4000	1361	69.27	7.31	18.25	40.84	34.75	6.09	0.24	0.01	0.00
6.27	3900	1327	67.54	7.37	18.26	40.17	34.31	5.86	0.11	0.01	0.00
5.75	3800	1293	65.81	7.43	18.42	39.42	33.74	5.68	0.11	0.01	0.00
5.24	3700	1259	64.08	7.48	18.65	38.69	33.22	5.46	0.28	0.01	0.00
4.73	3600	1224	62.29	7.56	18.84	38.01	32.76	5.25	0.00	0.01	0.00
4.22	3500	1190	60.56	7.64	19.12	37.37	32.34	5.03	0.48	0.01	0.00
3.73	3400	1156	58.83	7.69	19.37	36.54	31.70	4.84	0.22	0.01	0.00
3.24	3300	1122	57.10	7.69	19.56	35.45	30.81	4.64	0.51	0.01	0.00
2.76	3200	1088	55.37	7.74	19.65	34.60	30.14	4.46	0.22	0.01	0.00
2.27	3100	1054	53.64	7.78 Max	19.79	33.68	29.42	4.26	0.21	0.01	0.00
1.79	3000	1020	51.91	7.78	19.93	32.59	28.50	4.08	0.31	0.01	0.00
1.31	2900	986	50.18	7.75	19.97	31.38	27.49	3.89	0.00	0.01	0.00
0.84	2800	952	48.45	7.68	19.98 Max	30.02	26.30	3.72	0.99	0.01	0.00
0.36	2700	918	46.72	7.52	19.87	28.35	24.82	3.53	0.05	0.01	0.01